



UNIVERSITAT  
JAUME I

**UNIVERSITAT JAUME I**

**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES EXPERIMENTALS**  
**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

***PROYECTO DE ADAPTACIÓN DE UN VEHÍCULO  
OPERADO A DISTANCIA PARA  
EXPERIMENTACIÓN SUBACUÁTICA  
MULTIPROPÓSITO***

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**AUTOR/A**

Francisco Sayas Doménech

**DIRECTOR/A**

Sergio Chiva Vicent

Raúl Marín Prades

Castellón, septiembre de 2018



“Cerebro, ¿qué vamos a hacer esta noche?”

Pinky

“Lo mismo que hacemos todas las noches, Pinky: ¡tratar de conquistar el mundo!”

Cerebro





# Resumen

El Trabajo Final de Grado consiste en modificar un vehículo operado a distancia modelo BlueROV para permitir la realización de experimentos de exploración subacuática, comunicación inalámbrica y posicionamiento. El trabajo complementa a la investigación realizada durante el proyecto UJI Manipulación Subacuática Multipropósito para Intervención Arqueológica.

Las pruebas experimentales han sido realizadas en los laboratorios del grupo de investigación Interactive and Robotics Systems Lab, perteneciente al Departamento de Ingeniería y Ciencia de los Computadores y en el Laboratorio de Hidráulica Aplicada de la UJI, del Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Las pruebas de campo se han desarrollado en una piscina particular.

**Justificación:** En el ámbito de la exploración arqueológica y rescate submarino, el uso de ROVs es de gran utilidad para identificar escenarios y trazar planes de actuación. La principal limitación de estos es que tienen que ser controlados desde la superficie mediante un cable, llamado “umbilical”. Una de las líneas de investigación del IRSLab consiste en desarrollar sistemas de control inalámbricos.

Los vehículos que se encuentran actualmente en el mercado no están preparados directamente para la investigación en este campo, por lo que se precisa adaptar uno de ellos.

**Objetivos:** Integrar dos baterías de litio en el vehículo para dotarlo de autonomía. Instalar una cámara adicional para exploración submarina. Instalar un módem de comunicación subacuática por radiofrecuencia, modelo WFS S100. Instalar un módem de comunicación subacuática por ultrasonidos, Tritech Micron Data Modem. Instalar un sistema de posicionamiento GPS subacuático, del fabricante Water Linked.

**Metodología:** Selección del un vehículo operado remotamente como plataforma base de desarrollo. Modificación del vehículo, desarrollo de la estructura e integración mecatrónica de componentes. Evaluación en escenarios de interés: prueba de maniobrabilidad y captura de imágenes, prueba de comunicación inalámbrica de datos, prueba de teleoperación inalámbrica por radiofrecuencia.

**Palabras clave:** ROV, AUV, vehículo operado a distancia, BlueROV, comunicaciones submarinas, módem de radiofrecuencia, módem acústico, ArduSub, Pixhawk, Raspberry Pi.



Parte I

Índice



# Índice general

Resumen	III
I Índice	1
Índice general	3
Índice de figuras	6
Índice de tablas	7
II Memoria	9
1 Objeto	11
2 Alcance	13
3 Antecedentes	15
4 Normas y referencias	17
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas	17
4.2 Programas de cálculo	18
4.3 Plan de gestión de la calidad aplicado durante la redacción del Proyecto	18
4.4 Bibliografía	19
4.5 Otras referencias	20
5 Definiciones y abreviaturas	23
5.1 Definiciones	23
5.2 Abreviaturas	23

6	Requisitos de diseño	25
6.1	Condicionantes de diseño . . . . .	25
6.2	Dispositivos a integrar en el vehículo . . . . .	26
6.3	Conexiones eléctricas de los dispositivos . . . . .	29
7	Análisis de soluciones	31
7.1	Elección del vehículo operado a distancia . . . . .	31
7.2	Primer prototipo . . . . .	34
7.3	Pruebas con el módem de radiofrecuencia . . . . .	36
7.4	Propuesta estructural con perfilera de aluminio . . . . .	37
7.5	Segundo prototipo . . . . .	37
7.6	Solución propuesta . . . . .	40
8	Resultados finales	43
8.1	Estructura . . . . .	43
8.2	Arquitectura de hardware . . . . .	43
8.3	Componentes electrónicos . . . . .	44
8.4	Diseño del acumulador . . . . .	58
8.5	Disposición de los componentes . . . . .	61
8.6	Esquema de conexiones . . . . .	61
8.7	Tapa del cilindro de electrónica . . . . .	61
8.8	Análisis de resultados . . . . .	64
9	Planificación	67
10	Orden de prioridad entre los documentos	71
III	Anexos	73
IV	Planos	87
V	Pliego de condiciones	97
1	Condiciones técnicas	99
1.1	Preinscripciones sobre los materiales . . . . .	99
VI	Presupuesto	101
1	Presupuesto	103
1.1	Consideraciones . . . . .	103
1.2	Presupuesto . . . . .	104

# Índice de figuras

3.1. Cuba de pruebas del IRS Lab . . . . .	15
6.1. Low-Light HD USB Camera . . . . .	26
6.2. Wireless For Subsea Seetooth S100 . . . . .	27
6.3. Tritech Micron Data Modem . . . . .	28
6.4. Underwater GPS Explorer Kit . . . . .	28
7.1. OpenROV . . . . .	31
7.2. BlueROV . . . . .	32
7.3. SeaBotix . . . . .	33
7.4. Teleoperación del primer prototipo . . . . .	34
7.5. Diagrama de arquitectura del primer prototipo . . . . .	35
7.6. Experimento de transmisión con los módems de radiofrecuencia . . . . .	36
7.7. Estructura apilada superior . . . . .	37
7.8. Estructura apilada centrada . . . . .	37
7.9. Estructura modular impresa en 3D realizada por Alberto Cancho . . . . .	38
7.10. Diagrama de la segunda arquitectura propuesta . . . . .	39
7.11. Teleoperación del segundo prototipo . . . . .	40
7.12. Diagrama de la tercera arquitectura propuesta . . . . .	40
8.1. Diagrama de arquitectura de hardware de referencia del BlueROV 2 . . . . .	44
8.2. BlueRobotics T200 . . . . .	44
8.3. BlueRobotics Basic ESC R1 (Afro 30A Race Spec) . . . . .	45
8.4. 3DR Pixhawk 1 . . . . .	47

8.5. 3DR Power Module . . . . .	49
8.6. Raspberry Pi 3 modelo B . . . . .	49
8.7. Hobbywing UBEC 3A . . . . .	50
8.8. Multistar High Capacity 10000mAh 4S 12C Multi-Rotor Lipo Pack . . . . .	51
8.9. Conmutador . . . . .	52
8.10. Sensor de presión y temperatura BlueRobotics Bar02 . . . . .	53
8.11. Panasonic CB1aH-12V . . . . .	54
8.12. Módulo convertidor CC a CC . . . . .	56
8.13. Convertidor CC a CC aislado TRACO Power TEL 8-1215 . . . . .	56
8.14. Pruebas de comunicación por radiofrecuencia con los convertidores CC a CC . . .	58
8.15. Dimensiones del cilindro principal con la bandeja de electrónica instalada . . . . .	59
8.16. Detalle del tamaño relativo entre las celdas y la bandeja de electrónica . . . . .	59
8.17. Detalle de la disposición de celdas . . . . .	60
8.18. Numeración de referencia de los agujeros de la tapa . . . . .	61
8.19. Integración de dispositivos en el ROV . . . . .	64
8.20. Reducción del tamaño de la solución . . . . .	65



# Índice de tablas

6.1. Características principales de la cámara . . . . .	26
6.2. Características principales del módem de radiofrecuencia . . . . .	27
6.3. Características principales del módem acústico . . . . .	28
6.4. Características principales del kit de GPS subacuático . . . . .	29
6.5. Conexiones de los dispositivos . . . . .	29
7.1. Características principales de los ROVs . . . . .	33
8.1. Características principales de los propulsores BlueRobotics T200 . . . . .	45
8.2. Características principales de los BlueRobotics Basic ESC R1 . . . . .	46
8.3. Características principales del controlador de vuelo 3DR Pixhawk . . . . .	48
8.4. Características principales del módulo de potencia 3DR Power Module . . . . .	48
8.5. Comparativa de placas computadoras Raspberry Pi . . . . .	50
8.6. Características principales del UBEC . . . . .	51
8.7. Características principales del conmutador de BlueRobotics . . . . .	52
8.8. Características principales del sensor de presión y temperatura BlueRobotics Bar02 . . . . .	53
8.9. Características principales del relé . . . . .	54
8.10. Características principales del fusible 0287020 y portafusibles FHAC0002 de Littelfuse . . . . .	55
8.11. Características principales del convertidor CC a CC aislado TRACO Power TEL 8-1215 . . . . .	57
8.12. Características principales del módulo convertidor CC a CC . . . . .	57
8.13. Comparativa de las celdas Samsung INR18650-30Q y LG MH18650 . . . . .	60



Parte II

Memoria



## Capítulo 1

# Objeto

El presente Proyecto consiste en modificar un vehículo operado a distancia para permitir la realización de experimentos de exploración subacuática, comunicación inalámbrica y posicionamiento. Las modificaciones se deben realizar sobre alguno de los vehículos que posee el grupo de investigación IRS Lab (Interactive and Robotics Systems Lab), perteneciente al Departamento de Ingeniería y Ciencia de los Computadores de la Universitat Jaume I. Las pruebas de campo se llevan a cabo en una cuba de agua del laboratorio del grupo y en una piscina particular.

El desarrollo del Proyecto es requerido por el IRS Lab, que precisa de la obra para poder desarrollar los experimentos de investigación relacionados con uno de los proyectos en el que participa, MERBOTS.

Según lo publicado en la página electrónica del grupo de investigación, «MERBOTS es un proyecto de investigación en el que cooperan la Universitat de Girona (UdG), la Universitat de les Illes Balears (UIB) y la Universitat Jaume I (UJI) para progresar en el desarrollo de sistemas de intervención subacuáticos. En la actualidad, cuando una misión submarina es demasiado profunda y arriesgada para ser llevada a cabo por buzos, la alternativa consiste en utilizar vehículos operados a distancia (ROV). Esta es una solución difícil y costosa que requiere una sofisticada infraestructura de soporte y personal especializado. En consecuencia, el uso de tecnología robótica normalmente se limita a operaciones estratégicas o de alto valor agregado como rescate, industria marítima o seguridad y defensa. El proyecto MERBOTS propone un sistema y una metodología que permite tareas de intervención más seguras, con un coste menor y una operativa más simple. Además, con su desarrollo se pretende alcanzar nuevas áreas de aplicación como la arqueología marina a gran profundidad, y por lo tanto, obtener resultados importantes, no solo desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de vista científico, social o cultural.»

La metodología diseñada en el proyecto MERBOTS utiliza hasta tres vehículos que deben trabajar de forma simultánea para resolver los retos que les plantea una determinada misión. Un buen enlace de comunicación entre ellos es importante, por lo que se precisa desarrollar nuevos sistemas inalámbricos de comunicación subacuática que permitan a los vehículos intercambiar comandos e imágenes. El IRS Lab es el grupo de investigación de la UJI coordinador de MERBOTS

y encargado del subproyecto «Robots cooperativos marinos multifuncionales para dominios de intervención», que afecta al desarrollo de los sistemas de manipulación y comunicación del proyecto. Para poder iniciar la investigación en estos ámbitos, el grupo adquirió una serie de vehículos submarinos con la intención de modificarlos para incluir distintos dispositivos y realizar múltiples experimentos.

El vehículo precisa de varias cámaras para exploración, un sistema de posicionamiento subacuático y distintos dispositivos de comunicación inalámbrica. Se necesita, por tanto, desarrollar una solución modular, de bajo coste y de fácil implementación para poder adaptar rápidamente el ROV a las distintas pruebas.

En concreto, se requiere realizar las siguientes acciones sobre una de las plataformas disponibles:

- Integrar dos baterías de litio en el vehículo para dotarlo de autonomía.
- Instalar una cámara adicional para exploración submarina.
- Instalar un módem de comunicación subacuática por radiofrecuencia, modelo WFS S100.
- Instalar un módem de comunicación subacuática por ultrasonidos, modelo Trittech Micron Data Modem.
- Instalar un sistema de posicionamiento GPS subacuático, del fabricante Water Linked.

## Capítulo 2

# Alcance

El principal campo de aplicación de este Proyecto es la investigación y desarrollo de soluciones de comunicación y operación subacuáticas realizadas por el IRS Lab. Sin embargo, el mismo puede ser de interés para otros grupos de investigación en robótica submarina, fuerzas y cuerpos de seguridad con competencias de reconocimiento y rescate subacuático o biología, cartografía y exploración submarina en general.

El Proyecto desarrolla una solución de carácter eléctrico y electrónico, a la vez que describe las operaciones para testear el funcionamiento básico de todos los sistemas instalados. Si bien se indican algunas consideraciones estructurales y se diseñan piezas auxiliares, el desarrollo mecánico del vehículo queda fuera del alcance de este Proyecto.

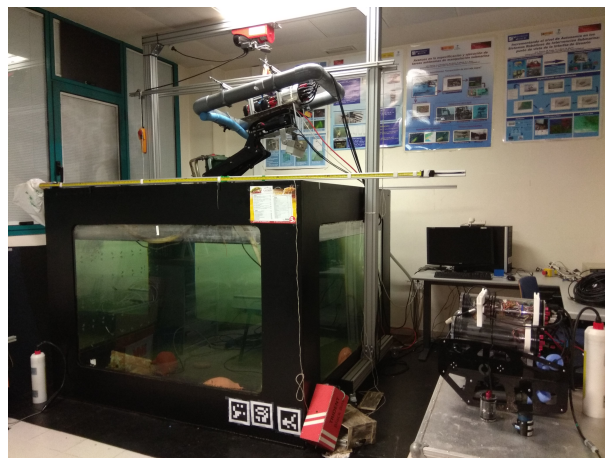




## Capítulo 3

# Antecedentes

El IRS Lab dispone, en su laboratorio de la UJI, de una cuba de agua de 2 m x 2 m x 1,5 m, en la que se realizan una parte de los experimentos que avalan que la solución adoptada funciona correctamente. Además, para las pruebas que requieren más espacio, se cuenta con una piscina particular de 10 m x 5 m x 2 m y de los permisos administrativos pertinentes para operar en el Puerto de Castellón y en una playa de Oropesa del Mar.



**Figura 3.1:** Cuba de pruebas del IRS Lab

Debido al tamaño de la cuba, en cuyo laboratorio se desarrolla la mayor parte de la investigación, los vehículos más aptos para la realización de experimentos son los conocidos como miniROVs: vehículos operados remotamente de tamaño reducido que facilita su manipulación y transporte por un único operario, sin precisar de grandes medios operativos. Estos vehículos son controlados utilizando un cable umbilical, que puede llevar la comunicación entre la superficie y el ROV y la alimentación eléctrica, si no está integrada en el mismo. Los ROVs suelen ajustarse mediante la colocación de lastre o flotadores, equiparando su densidad a la del agua con el fin de evitar el continuo funcionamiento de los motores para mantener la profundidad. La electrónica se aloja en compartimentos transparentes de forma cilíndrica, quedando en su interior aislada del agua gracias

al uso de juntas tóricas en las tapas de dichos compartimentos y resina epoxi en los pasamuros, las piezas por las que son pasados los cables.

El IRS Lab dispone de tres ROVs de este tipo que deben ser analizados para la realización del Proyecto: un OpenROV, un BlueROV y un SeaBotix. También posee los diferentes sistemas de comunicaciones y posicionamiento para integrar en el vehículo.

## Capítulo 4

# Normas y referencias

### 4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas

#### 4.1.1 *Marcado CE*

Las Directivas de Marcado CE que serían de aplicación en caso de que el resultado del Proyecto quisiera ser comercializado son las siguientes:

- Compatibilidad Electromagnética (EMC).
- Equipos radioeléctricos y equipos terminales de telecomunicación y reconocimiento mutuo de su conformidad (RTTE).
- Restricción uso de sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrodomésticos (ROHS).

#### 4.1.2 *Comisión Electrotécnica Internacional (CEI)*

- SC 17C Assemblies.
- TC 21 Secondary cells and batteries.
- SC 21A Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes.
- TC 32 Fuses.
- TC 44 Safety of machinery - Electrotechnical aspects.
- SC 47F Micro-electromechanical systems.
- SC 48D Mechanical structures for electrical and electronic equipment.
- TC 94 All-or-nothing electrical relays.

#### **4.1.3 Comité Europeo de Normalización Electrónica (CENELEC)**

- CLC/SC 18XC Subsea equipment.
- CLC/SR 23 Electrical accessories.
- CLC/SR 23B Plugs, socket-outlets and switches.
- CLC/SR 25 Quantities and units.
- CLC/SR 47F Micro-electromechanical systems.
- CLC/SR 48D Mechanical structures for electronic equipment.
- CLC/SR 80 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems.
- CLC/TC 94 Relays.
- CLC/SR 94 All-or-nothing electrical relays.
- CLC/SR 103 Transmitting equipment for radiocommunication.
- CLC/BTTF 60-1 Assembly of electronic equipment.

#### **4.1.4 IEC**

- IEC 62620:2014 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications.

#### **4.1.5 ISO**

- ISO 17894:2005 Ships and marine technology – Computer applications – General principles for the development and use of programmable electronic systems in marine applications.

#### **4.1.6 Asociación Española de Normalización (AENOR )**

AENOR ratifica mediante normas UNE la mayoría de las normas expuestas en este capítulo.

### **4.2 Programas de cálculo**

En el presente Proyecto no se utiliza ningún programa de ingeniería específico para realizar los cálculos.

### **4.3 Plan de gestión de la calidad aplicado durante la redacción del Proyecto**

En ausencia de un plan de gestión dedicado, las siguientes acciones han sido desarrolladas para intentar garantizar la calidad del Proyecto.

- Asistencia al curso de refuerzo para la preparación del trabajo fin de grado dirigido a alumnos matriculados en la asignatura de TFG de los grados en ingeniería del ámbito industrial, or-

ganizado por el Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción de la Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales de la Universitat Jaume I.

- Estudio previo de normativa y reglamentación aplicable.
- Realización de experimentos con los principales dispositivos electrónicos que conforman la solución diseñada.
- Elaboración del Proyecto según norma UNE 157001:2014: «Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico».
- Establecimiento de un protocolo de revisión y corrección de errores.
- Revisión por parte del futuro usuario de la funcionalidad de la solución proyectada.
- Revisión por parte del supervisor del marco teórico del Proyecto.
- Revisión por parte del tutor académico de la estructura general del Proyecto.
- Revisión por parte de una Ingeniera en Diseño Industrial y Desarrollo de Productos de la coherencia y cohesión de los desarrollos expuestos en el Proyecto.
- Revisión por parte una Ingeniera Química y progenitora del proyectista de errores de tipografía y digitación.

## 4.4 Bibliografía

BatteryUniversity (2018). «BU-205: Types of Lithium-ion». En: *batteryuniversity.com*.

Cancho Soler, Alberto (2018). «Memoria de Prácticas - DI1047 Prácticas Externas». Tesis de maestría. Universitat Jaume I (vid. pág. 37).

Centelles, Diego y col. «Evaluación de la arquitectura ARMv7-A para el desarrollo de HROV's eficientes». En: ().

Centelles, Diego y col. (2015). «Wireless RF camera monitoring for underwater cooperative robotic archaeological applications». En: *Instrumentation viewpoint* 18, págs. 51-52.

Centelles Beltran, Diego y col. (mayo de 2015). «Underwater radio frequency based localization and image transmission system, including specific compression techniques, for autonomous manipulation». En: págs. 1-5.

Centelles Beltran, Diego y col. (jun. de 2017). «Wireless HROV control with compressed visual feedback over an acoustic link». En: págs. 1-7.

Hostler, A., B. Benson y J. Warner (2017). «BudgetROV: An ultra low cost robotics platform for education and research». En: *OCEANS 2017 - Aberdeen*, págs. 1-4. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084649.

Masmitja, Ivan y col. (2018). «Boletín de automar: Grupo temático de automática y robótica para la industria marítima y las ciencias marinas del Comité Español de Automática». En: *Boletín de Automar* 6, págs. 1-2.

Oliver Blasco, David (2016). «Diseño, fabricación y validación de un acumulador de celdas de litio para una motocicleta de competición». Tesis de mtría. Universitat Jaume I (vid. pág. 59).

Peñalver Monfort, Antonio y Pedro José Sanz Valero (2016). «MERBOTS: New approach for semi-autonomous underwater manipulation using force sensing in archaeological scenarios». En:

Ridao, P, P Sanz y G Oliver (2016). «Merbots project». En: URL: <http://www.irs.uji.es/merbots/consortium>.

Rubino, Eduardo y col. (dic. de 2015). «Wireless Image Compression and Transmission for Underwater Robotic Applications?» En: 48, págs. 288-293.

Rubino, Eduardo y col. (jun. de 2017a). «Progressive image compression and transmission with region of interest in underwater robotics». En: págs. 1-9.

Rubino, Eduardo y col. (nov. de 2017b). «Sistema de Visión Subacuático Inalámbrico Usando un Algoritmo de Compresión Progresivo con Región de Interés». En:

Rubino, Eduardo y col. (ago. de 2017c). «Underwater radio frequency image sensor using progressive image compression and region of interest». En: 39.

Sales, J y col. «Integración de técnicas ópticas de reconstrucción 3D para mejorar la planificación de agarres en tareas de manipulación arqueológica subacuática». En: ().

Sanz, Pedro J y col. (2017). «Merbots project: overall description, multisensory autonomous perception and grasping for underwater robotics interventions». En: *Actas de las XXXVIII Jornadas de Automática*.

## 4.5 Otras referencias

Para la realización del Proyecto es de gran utilidad la documentación encontrada en las páginas electrónicas de los sistemas con los que se trabaja, así como la disponible en foros, blogs y otros canales de discusión oficiales de cada producto, siendo de mención especial:

- <http://www.irs.uji.es/>
- <http://docs.bluerobotics.com/>
- <https://discuss.bluerobotics.com/>
- <https://www.ardusub.com/>
- <http://ardupilot.org/ardupilot/>
- <https://docs.px4.io/en/>

Las imágenes de los dispositivos utilizados han sido obtenidas del sitio oficial de los respectivos fabricantes. En ningún caso la propiedad de las mismas pertenece al autor del Proyecto. Del mismo modo, los esquemas técnicos como los que describen las dimensiones o el conexionado de un producto han sido extraídos de las hojas de datos correspondientes.





## Capítulo 5

# Definiciones y abreviaturas

### 5.1 Definiciones

**Cable umbilical:** Conjunto de conductores mediante los cuales un operador se comunica con un vehículo submarino. En caso de que el vehículo no lleve baterías propias, también es usado para dotarlo de alimentación eléctrica.

**Cilindro principal:** Parte del ROV en la que se encuentra la electrónica básica que permite su funcionamiento.

**Pasamuros o penetrador:** Pieza hueca que atraviesa la superficie del ROV, y por cuyo interior pasa uno o diversos cables. Su sellado con resina epoxi permite que el recipiente que contiene la electrónica sea estanco.

### 5.2 Abreviaturas

**AUV:** Acrónimo del inglés Autonomous Underwater Vehicle (vehículo submarino autónomo).

**HROV:** Acrónimo del inglés Hybrid Remote Operated Vehicle.

**ROV:** Acrónimo del inglés Remote Operated Vehicle (vehículo operado a distancia). Aunque el término incluye vehículos terrestres y aéreos, el término normalmente se emplea para referirse a los dispositivos submarinos.



## Capítulo 6

# Requisitos de diseño

### 6.1 Condicionantes de diseño

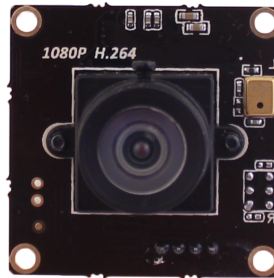
Las características que condicionan la elección y modificación del vehículo son las siguientes:

- **Funcionalidad:** ante todo, el ROV debe cumplir con los objetivos para poder realizar los experimentos del proyecto MERBORTS. Se requiere una solución de hardware que permita que el vehículo pueda operar de forma totalmente inalámbrica utilizando únicamente el módem de frecuencia , el acústico o ambos de modo simultáneo. Además, para poder realizar los experimentos de posicionamiento mediante GPS, es necesario que el vehículo tenga conexión con la superficie mediante un cable umbilical de comunicación.
- **Modularidad:** los distintos dispositivos a integrar deben poder funcionar simultáneamente, por separado y en cualquier combinación. También se deben prever posibles instalaciones futuras de instrumentos con características de alimentación eléctrica y comunicación similares.
- **Operabilidad:** la solución adoptada debe ser adecuada para que un único usuario sin conocimientos técnicos detallados acerca de la construcción del ROV pueda utilizarlo fácilmente. El procedimiento de puesta en marcha del ROV no debe durar más de quince minutos.
- **Tamaño:** el vehículo debe poder ser maniobrado en la cuba del laboratorio, por lo que el tamaño tiene que ser el adecuado para permitirlo.
- **Resistencia:** el ROV debe resistir pequeños impactos sin que estos causen la rotura de sus componentes. Además, se requiere que todas las partes expuestas al agua salada sean resistentes a la corrosión.
- **Compatibilidad:** se precisa que los conectores de alimentación eléctrica y comunicación empleados en la solución sean compatibles, en la medida de lo posible, con las interfaces ya existentes en el grupo de investigación.

- **Viabilidad económica:** las modificaciones realizadas al vehículo deben ser asumibles por el grupo de investigación. Además, siempre que sea factible, el desarrollo de la solución debe contemplar la utilización de material del que ya se dispone en el laboratorio. Del mismo modo se requiere aprovechar las herramientas disponibles de montaje.
- **Autonomía:** el vehículo debe tener una autonomía superior a la media hora y que el acumulador o conjunto de baterías que integre pueda ser recargado fácilmente y de forma segura mediante una conexión que no requiera desensamblar el mismo.

## 6.2 Dispositivos a integrar en el vehículo

### 6.2.1 Cámara digital



**Figura 6.1:** Low-Light HD USB Camera

Basada en el sensor Sony IMX322, esta cámara digital de alta definición tiene un buen rendimiento en aplicaciones de baja luminosidad, un chip de compresión H.264 y una lente gran angular de baja distorsión para proveer una alta calidad de vídeo en aplicaciones submarinas.

El chip de compresión de vídeo integrado permite que el ordenador al que se conecta la cámara no tenga que realizar esta tarea, por lo que la carga de trabajo del procesador es reducida.

La cámara incluye un cable USB con un conector JST-PH.

Dimensiones	32 mm x 32 mm
Campo de visión horizontal	80°
Campo de visión vertical	64°
Resolución	1080p
Conector	JST-PH a USB
Precio	89 €

**Tabla 6.1:** Características principales de la cámara

### 6.2.2 M3dodem de radiofrecuencia



**Figura 6.2:** Wireless For Subsea Seatooth S100

El Seatooth S100, desarrollado por Wireless For Subsea, es un m3dodem de radiofrecuencia dise13ado para funcionar en entornos submarinos. Seg3n el fabricante, una pareja de estos m3dodems se pueden comunicar a trav3s del agua marina o del aire, con una velocidad de  $2,4 \text{ kbit s}^{-1}$  semid3plex a una de distancia de hasta 7 m.

Banda de frecuencia	125 kHz
Velocidad de transferencia de datos	$2,4 \text{ kbit s}^{-1}$
Distancia de transmisi3n	7 m
Interfaz de comunicaci3n	RS-232
Voltaje de alimentaci3n	24-28 V CC
Intensidad de alimentaci3n	5 A a 24 V
Conector	SubConn MCBH12F
Dimensiones	340 mm x 90 mm x 90 mm
Peso en agua de mar	2,22 kg
Profundidad	1000 m
Precio (2 ud.)	5173,34 €

**Tabla 6.2:** Características principales del m3dodem de radiofrecuencia

### 6.2.3 M3dodem ac3stico

El Tritech Micron Data Modem es un dispositivo compacto de comunicaciones subacuáticas capaz, seg3n datos del fabricante, de alcanzar una tasa de transmisi3n de datos semid3plex de 40 bits por segundo a una distancia m3xima de 500 m.



**Figura 6.3:** Tritech Micron Data Modem

Banda de frecuencia	20-28 kHz
Velocidad de transferencia de datos	40 bit s <sup>-1</sup>
Distancia de transmisión horizontal	500 m
Distancia de transmisión vertical	100 m
Interfaz de comunicación	RS-232 o RS-485
Voltaje de alimentación	12-48 V CC
Intensidad de alimentación	7.92W (330mA at 24V)
Consumo de potencia en recepción	0.72W (30mA at 24V)
Conector	Propietario
Dimensiones	79 mm x 68 mm x 56 mm
Peso en el agua	235 g
Peso en el aire	80 g
Profundidad	750 m
Precio	3000 €

**Tabla 6.3:** Características principales del módem acústico

#### 6.2.4 Localizador GPS



**Figura 6.4:** Underwater GPS Explorer Kit

El Underwater GPS Explorer Kit es un sistema portátil desarrollado por Water Linked para permitir la localización de elementos que se desplacen en un entorno subacuático. El producto combina la posición detectada en la superficie por un receptor GPS con la determinada en el agua

mediante un localizador emisor de pulsos de presión instalado en un ROV y cuatro receptores cercanos a la superficie.

Rango de funcionamiento	100 m
Voltaje de alimentación	10-18 V CC
Conector	Binder Serie 770
Dimensiones de la caja de control	27 cm x 24,6 cm x 12,4 cm
Dimensiones del localizador	41 mm x 20 mm x 20 mm
Peso de la caja de control	4 kg
Peso en el aire del localizador	30 g
Profundidad	300 m
Precio	4800 EUR + IVA

**Tabla 6.4:** Características principales del kit de GPS subacuático

### 6.3 Conexiones eléctricas de los dispositivos

Los requisitos de alimentación y comunicación de los dispositivos a integrar en el vehículo son los siguientes:

	Cámara	Módem radiofrecuencia	Módem ultrasonidos	Localizador GPS
Alimentación	5 V (USB)	24-30 V, 5 A	12-48 V, 8 W	-
Comunicación	USB	RS-232	RS-232	Ethernet

**Tabla 6.5:** Conexiones de los dispositivos





## Capítulo 7

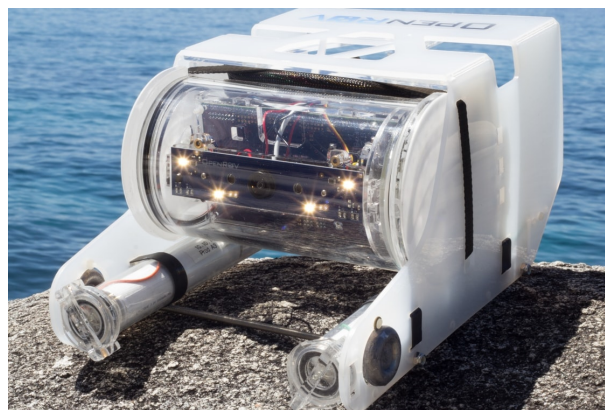
# Análisis de soluciones

### 7.1 Elección del vehículo operado a distancia

#### 7.1.1 Características de los ROVs disponibles

En primer lugar, se requiere seleccionar adecuadamente entre los disponibles en el IRS Lab el vehículo sobre el cual se va a realizar la integración de los diferentes dispositivos. El grupo de investigación dispone de tres modelos que pueden ser modificados:

##### *OpenROV*

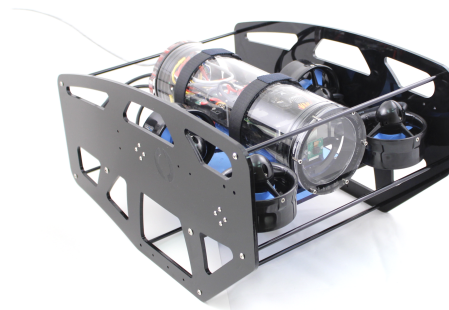


**Figura 7.1:** OpenROV

El OpenROV es un minisubmarino operado remotamente lanzado en 2012 como proyecto de hardware libre. Está concebido como un kit de montaje DIY (del inglés Do-It-Yourself, hazlo tú mismo). Es pequeño y sencillo de transportar. Incorpora tres motores sin escobillas de uso típico en aeromodelismo que se deben modificar para su apto funcionamiento bajo el agua. La electrónica de control consiste en una placa basada en Arduino Mega y una placa computadora BeagleBone Black

y se alimenta mediante seis baterías de litio tipo 26650 que le otorgan una autonomía aproximada de dos horas. Tiene una pequeña zona de carga para la instalación de dispositivos auxiliares. Es capaz de alcanzar los 100 metros de profundidad. Se controla desde un ordenador a través de un cable umbilical de dos hilos mediante tecnología Power Line Communications (PLC). Dispone de una cámara HD que puede ser inclinada en varios ángulos mediante un servo, dos punteros láser para estimar el tamaño de objetos mediante imágenes y luces LED de alta potencia. Tiene una masa de 2,6 kg, unas dimensiones de 30 cm x 20 cm x 15 cm y un coste aproximado de 1300 € si se adquiere ya montado.

### *BlueROV*



**Figura 7.2:** BlueROV

El BlueROV es un vehículo desarrollado por BlueRobotics y soportado también por una comunidad abierta. La principal innovación que aportó con su llegada al mercado fue el desarrollo de unos propulsores de bajo coste específicos para aplicaciones submarinas. Incorpora seis de ellos en una configuración que le otorgan seis grados de libertad. El BlueROV presenta una estructura más amplia y robusta que la del OpenROV, basada en perfilera de aluminio, paneles de metacrilato y poliacetal para facilitar las modificaciones. La solución electrónica más extendida, que no está incluida en la compra del vehículo, consiste en la combinación de un módulo de piloto automático Pixhawk PX4 y una placa computadora Raspberry Pi. En su configuración original, se comunica con un ordenador de superficie mediante un cable Ethernet, utilizando el software ArduSub.

BlueRobotics tiene disponibles múltiples accesorios para extender las funcionalidades del ROV, como sensores para medir diferentes magnitudes físicas, pinzas para manipulación subacuática o detectores de pérdida de estanqueidad. Gracias a todos estos recursos, este proyecto es considerado una referencia en el mundo de los vehículos operados remotamente y la exploración subacuática.

*SeaBotix LBV200-4***Figura 7.3:** SeaBotix

El SeaBotix LBV200-4 es uno de los productos que ofrece Teledyne Marine, una empresa con un amplio catálogo de mini ROVs y otras aplicaciones submarinas. A diferencia de los dos anteriores, este vehículo es un producto profesional de alta calidad, completamente montado y preparado para una puesta en escena rápida. Alcanza 200 m de profundidad. Tiene cuatro motores que le permiten desplazarse en cuatro grados de libertad. Se opera desde una interfaz de control dedicada y se alimenta con corriente alterna. Su precio es de 40 000 €.

**7.1.2 Selección del ROV**

	OpenROV	BlueROV	SeaBotix
Tipo	Kit de montaje	Kit de desarrollo	Producto final
Dimensiones	300 mm (largo) 200 mm (ancho) 150 mm (alto)	483 mm (largo) 330 mm (ancho) 267 mm (alto)	530 mm (largo) 245 mm (ancho) 254 mm (alto)
Masa	2,6 kg	3,73 kg	11 kg
Grados de libertad	3	6	4
Empuje	n. d.	4,72 kgf 7,08 kgf 2,36 kgf	7 kgf 3 kgf 3 kgf
Profundidad máxima	100 m	100 m	200 m
Autonomía	3 h	-	-
Electrónica	Arduino + BeagleBone	Pixhawk + Raspberry Pi	Propietaria
Precio	USD 900	+ 3000 EUR	40000 EUR

**Tabla 7.1:** Características principales de los ROVs

El OpenROV queda descartado por su pequeño tamaño en relación a los distintos elementos que deben ser integrados. El BlueROV y el SeaBotix tienen unas dimensiones similares. Sin embargo, modificar el primero es más conveniente ya que forma parte de un proyecto de hardware libre y toda la información de su construcción está disponible en línea. Todos los elementos del proyecto están publicados bajo licencias abiertas y libres, hecho que facilita enormemente la adaptación de la plataforma y la integración de los distintos sistemas para cumplir los objetivos del Proyecto.

Estas licencias permiten, entre otras características, la modificación, distribución y uso comercial de los contenidos sobre los que están aplicadas.

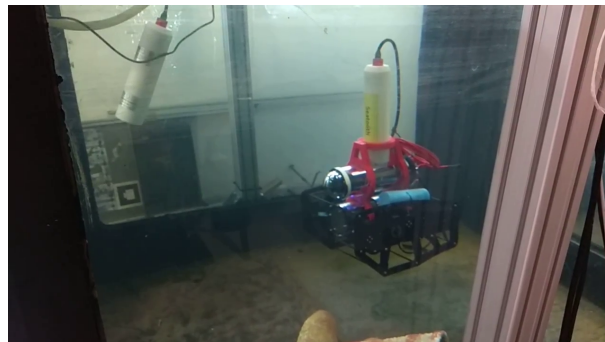
Por otra parte, el elevado precio del SeaBotix impide que en un futuro la solución pueda ser reproducible con otro vehículo de este modelo, además de no existir ningún tipo de documentación de ayuda para su modificación, por lo que la elección del BlueROV se considera la más adecuada.

La estructura del BlueROV está formada por dos láminas de metacrilato unidas por seis varillas de aluminio y dos perfiles de ranura en T. Sobre los perfiles se asienta una tercera plancha sobre la que se sitúa el cilindro destinado, en el diseño original del BlueROV, a contener la electrónica. En adelante se hará referencia a este cilindro como cilindro principal. Para realizar la integración, se dispone de otros cilindros de metacrilato de diversos tamaños, que pueden ser utilizados para contener la electrónica de los sistemas auxiliares.

Por otra parte, el conjunto de la electrónica disponible que posee el grupo de investigación para realizar el montaje del BlueROV está formado por una placa computadora Raspberry Pi 2 modelo B y una placa controladora de vuelo 3DR Pixhawk PX4.

La necesidad del grupo de investigación de empezar a experimentar y a testear los dispositivos rápidamente impulsan la creación de una serie de prototipos, que sirven de base para el desarrollo de la solución final.

## 7.2 Primer prototipo



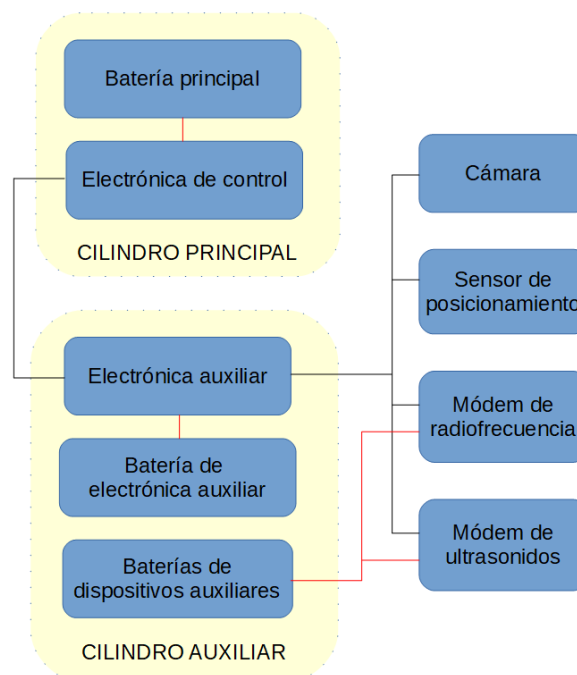
**Figura 7.4:** Teleoperación del primer prototipo

El primer prototipo se construye con la finalidad de testear rápidamente las capacidades del módem de radiofrecuencia. La estructura se realiza uniendo por soldadura varias piezas fabricadas mediante deposición de filamento fundido.

La arquitectura electrónica utilizada consiste en una segunda placa computadora Raspberry Pi 2 modelo B instalada en un cilindro auxiliar, que se encarga exclusivamente de gestionar la conexión serie con el módem. Esta se puede comunicar, o bien con la superficie mediante un cable umbilical Ethernet para realizar pruebas de redimiento de la comunicación por radiofrecuencia, o con la electrónica principal para tener un ROV inalámbrico. El sistema queda alimentado mediante tres baterías: una de ellas instalada en el cilindro principal para alimentar a la electrónica de control de vehículo y las restantes en el cilindro auxiliar, para suministrar potencia a la Raspberry Pi y al módem.

Las características más representativas del prototipo son las siguientes:

- Estructura impresa en 3D, con soporte para el módem de radiofrecuencia y dos cilindros.
- Conector de cable umbilical de comunicación.
- Conector de cable umbilical de potencia. Posibilidad de alimentación de la electrónica principal de forma externa.
- Batería de 14,8 V y 10 Ah instalada en el cilindro principal, dedicada a alimentar la electrónica de control.
- Batería de 24,8 V y 6,6 Ah instalada en el cilindro auxiliar, dedicada a alimentar el módem de radiofrecuencia.
- Batería de 5 V (power bank) instalada en el cilindro auxiliar, dedicada a alimentar la electrónica auxiliar.
- Fijación vertical del módem de radiofrecuencia.



**Figura 7.5:** Diagrama de arquitectura del primer prototipo

El primer prototipo es probado durante el mes de noviembre de 2017 y llega a ser teleoperado de forma inalámbrica, hecho que marca un hito importante en el desarrollo del proyecto de investigación MERBOTS y valida el diseño electrónico realizado. Sin embargo, presenta diversos inconvenientes:

- La solución requiere de la monitorización y recarga de tres baterías, teniendo que desmontar casi por completo el vehículo cada vez que una de ellas se descarga.
- La autonomía es reducida, de media hora aproximadamente.

- La puesta en marcha del vehículo no es rápida. Dos operarios precisan de 90 minutos para preparar el ROV.

El primer prototipo cumple su función como punto de partida y permite que el grupo de investigación avance en el desarrollo del proyecto MERBOTS. No obstante, los inconvenientes observados se deben solucionar para facilitar la utilización del vehículo.

### 7.3 Pruebas con el módem de radiofrecuencia



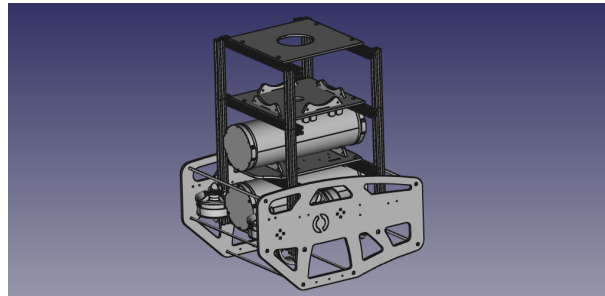
**Figura 7.6:** Experimento de transmisión con los módems de radiofrecuencia

A pesar del éxito del resultado del primer prototipo, eventualmente se pueden observar errores en la transmisión de datos a través del módem. Bajo la sospecha de que la cuba, de reducidas dimensiones y con partes metálicas, pueda estar influenciando en la comunicación, en enero de 2018 se plantean una serie de experimentos en una piscina particular.

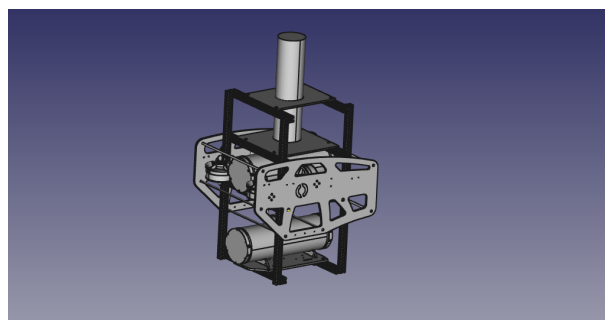
Las pruebas requieren una estructura para dos módems de radiofrecuencia en la que estos no queden en contacto con ninguna parte metálica. Se realizan mediante perfilera de aluminio y tubos de espuma de polietileno reticulado de celda cerrada (coloquialmente conocidos como «patatas» o «churros» de piscina) dos boyas a las que se les acopla un listón de madera vertical, en el que se coloca el módem.

Mediante los experimentos se comprueba que el módem funciona correctamente y según las especificaciones de velocidad y rango que afirma el fabricante. Los resultados también invitan a probar diferentes configuraciones de alineación del módem de radiofrecuencia en el BlueROV para intentar encontrar una orientación más adecuada.

## 7.4 Propuesta estructural con perfilería de aluminio



**Figura 7.7:** Estructura apilada superior



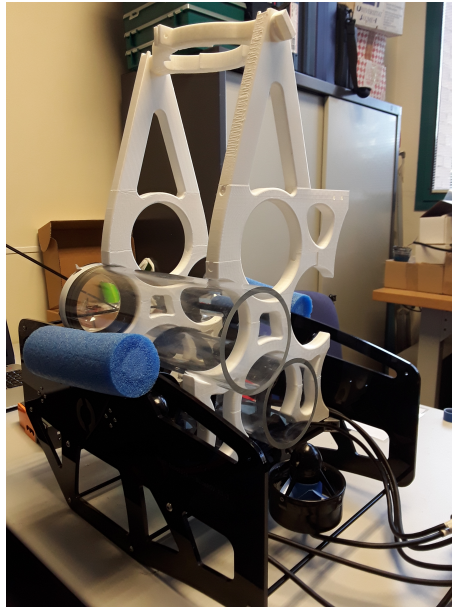
**Figura 7.8:** Estructura apilada centrada

Con el fin de mejorar la estructura respecto al primer prototipo, se propone una solución mecánica que intenta mantener cierta similitud en el diseño respecto al BlueROV original. El montaje consiste en la creación de varios niveles similares a la plataforma ya existente en el vehículo mediante perfilería de aluminio y láminas de metacrilato, en los que se instalaría el cilindro auxiliar y el módem en cualquier orientación de los ejes principales. Se conciben dos aplicaciones diferentes de esta idea. No obstante, finalmente se descarta en favor de una propuesta de impresión 3D (Cancho Soler 2018). Es por ello que la estructura del ROV queda fuera del alcance de este Proyecto.

## 7.5 Segundo prototipo

El segundo prototipo cuenta con la nueva estructura modular en la que las distintas partes pueden ser ensambladas y desensambladas fácilmente, permitiendo la adaptación de la misma según la presencia de los distintos dispositivos a integrar. Esta aprovecha el espacio entre los distintos niveles colocando cilindros también a los laterales y permitiendo que el ROV tenga un aspecto menos esbelto, lo que contribuye a mejorar la estabilidad del vehículo. En el plano eléctrico, el vehículo cuenta ahora con dos baterías de 14,4 V y 10 Ah dispuestas en paralelo en dos cilindros diferentes, que conforman un acumulador de 14,4 V y 20 Ah. Los diferentes niveles de tensión requeridos por los dispositivos se consiguen mediante el uso de reguladores de voltaje. Además se incorporan un conmutador subacuático general y un relé de encendido por batería, con un circuito de activación común.



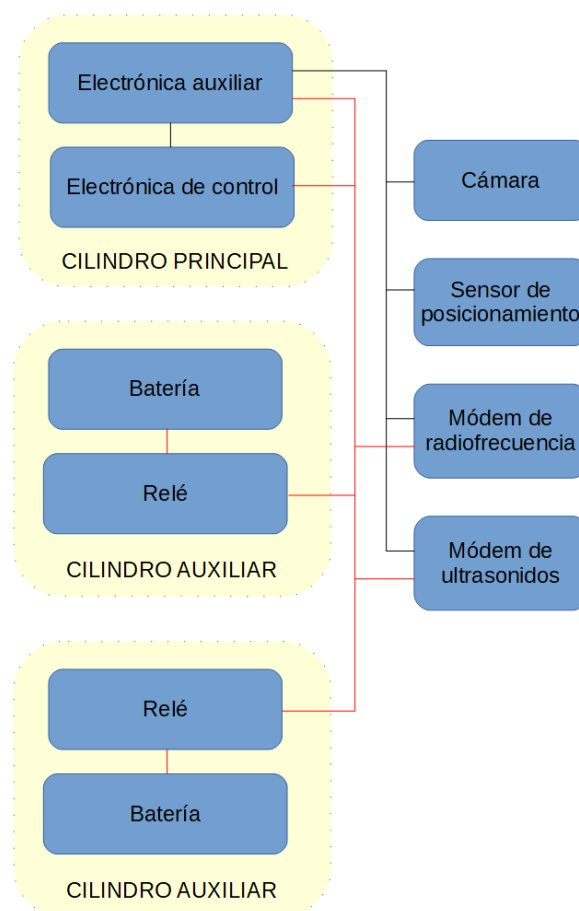


**Figura 7.9:** Estructura modular impresa en 3D realizada por Alberto Cancho

Con las modificaciones mencionadas, el segundo prototipo mejora notablemente algunas deficiencias del primero, y añade nuevas características:

- Se utiliza una única fuente de alimentación en el vehículo, aunque formada por dos baterías.
- Pese a tener todo los dispositivos conectados al mismo acumulador, la autonomía del ROV aumenta considerablemente, ya que curva de descarga de las baterías del primer prototipo no son similares entre ellas. Los motores demandan la mayor parte de la potencia y el resto de consumos son casi despreciables en el cálculo de la autonomía.
- La puesta en marcha del vehículo es instantánea. Se acciona el conmutador y en cuestión de segundos arranca toda la electrónica. No se requiere desmontar ninguna parte del ROV para ello.
- El módem de radiofrecuencia puede ser rotado sobre el eje transversal y fijado en varios ángulos.
- La estructura es modular, lo que permite añadir o quitar fragmentos de la estructura según sea necesario.
- Además, la estructura incorpora un punto de anclaje para el módem acústico.
- El prototipo disminuye ligeramente su altura respecto al primero, y se opera con mayor facilidad.
- Con esta solución es posible el montaje de cuatro cilindros, ampliando las capacidades del ROV para albergar más instrumentos a pesar de que todos ellos estén parcialmente ocupados.
- Se incluye un conector de carga y balanceo de las baterías, que a su vez puede servir también para alimentar otros sensores.
- Se reduce la congestión del cilindro principal, haciendo que sean más fáciles las tareas de mantenimiento en el mismo.



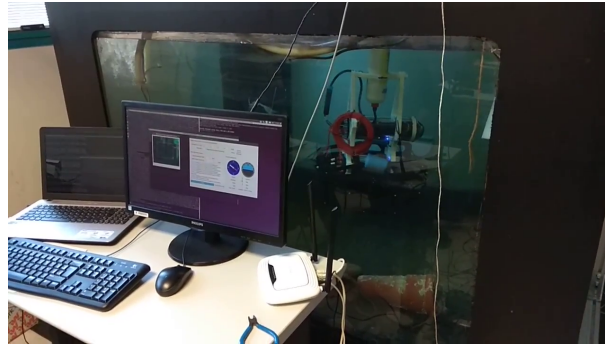


**Figura 7.10:** Diagrama de la segunda arquitectura propuesta

Sin embargo, este montaje también presenta algunos inconvenientes:

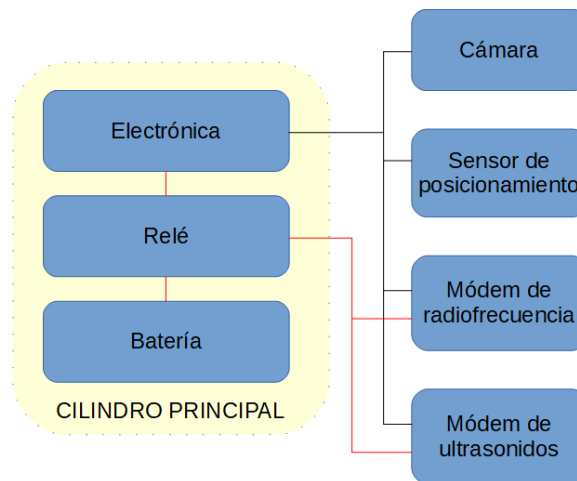
- La estructura no es tan sencilla ni rápida de imprimir como la primera, por lo que se precisa una impresora 3D con una excelente calibración y un buen mantenimiento para poder imprimir las piezas correctamente.
- Se desperdicia mucho volumen aprovechable. La flotabilidad del vehículo aumenta considerablemente, por lo que se requiere compensarla con una mayor cantidad de lastre.
- La configuración en paralelo con las baterías distantes supone un peligro de seguridad. En caso de rotura de uno de los cables, la totalidad de la corriente circularía únicamente por los otros conductores principales de conexión de la otra batería. Al estar conectadas las celdas de ambas baterías en paralelo, por los cables que se encargan de realizar esta conexión celda a celda podría circular una corriente elevada, sin que estos estén diseñados para ello.

El segundo prototipo afianza las directrices de diseño empleadas para cumplir con los requisitos y objetivos del Proyecto, pero se considera necesario realizar una nueva propuesta con carácter de solución final que dé respuesta a los inconvenientes hallados.



**Figura 7.11:** Teleoperación del segundo prototipo

## 7.6 Solución propuesta



**Figura 7.12:** Diagrama de la tercera arquitectura propuesta

Con la experiencia adquirida tras haber desarrollado y evaluado los prototipos, se propone una solución que aúna los puntos fuertes de cada uno de ellos y trata de solventar los débiles.

Utilizar el primer prototipo es difícil debido a que continuamente se deben desmontar los cilindros para desconectar el vehículo o cargar las baterías, complicando más la operación el hecho de que la electrónica esté concentrada únicamente en dos cilindros. El segundo prototipo evita el desensamblaje repetitivo del mismo instalando un conmutador de encendido y un conector de carga, pero la solución emplea finalmente cuatro cilindros. Si el ROV no tuviera que desmontarse continuamente, el criterio de diseño de evitar la complejidad de la disposición electrónica de los cilindros podría quedar en un segundo plano. ¿Sería posible realizar un diseño que utilice un único cilindro que no tenga que ser desmontado?

Las baterías utilizadas en los prototipos son de celdas prismáticas, que se caracterizan por su alta corriente de descarga. Sin embargo, las celdas que tienen más densidad energética son las cilíndricas. Si se diseña un acumulador formado por unidades de este tipo y adaptado al hueco disponible en el cilindro principal, es posible que puedan ser integrados todos los componentes en un único cilindro. Se puede también combinar la electrónica de control y la electrónica auxiliar, realizando todo el trabajo en una misma placa computadora.

Las características de este nuevo planteamiento son los siguientes:

- Se integra un acumulador diseñado específicamente en el cilindro de electrónica principal, así como su correspondiente circuito de protección y carga.
- Se instalan los reguladores de voltaje necesarios para alimentar a los diferentes dispositivos.
- Se instala una placa computadora con potencia de procesamiento suficiente tanto para encargarse del control del vehículo como con la gestión de los dispositivos adicionales.
- Se prescinde de cualquier cilindro auxiliar. La solución proyectada maximiza el aprovechamiento del espacio del cilindro principal. A falta del desarrollo estructural adecuado, se minimizan al máximo las dimensiones del vehículo. Este, en ausencia de los dispositivos externos, ocupa lo mismo que el BlueROV original.
- Se reduce la complejidad del diseño eléctrico, evitando tener que comunicar distintos cilindros.

Los inconvenientes de la propuesta radican en el aumento de la complejidad del montaje y mantenimiento del cilindro principal, al tener toda la electrónica integrada en el mismo, y la saturación de los huecos disponibles en el cilindro para los penetradores. Sin embargo, con esta solución se espera que el cilindro no tenga que desmontarse habitualmente y que si se incorporan otros dispositivos en el futuro, puedan comunicarse a través de las conexiones disponibles.



## Capítulo 8

# Resultados finales

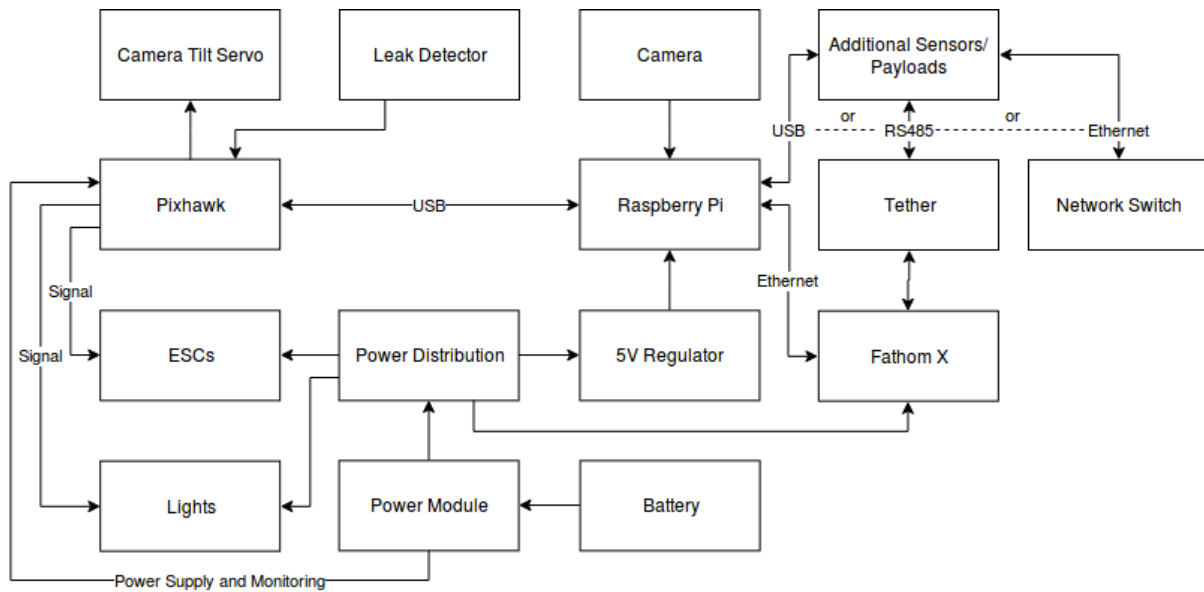
*El proceso de selección de cada dispositivo de la arquitectura de hardware recae en el análisis de características de otros componentes. Ante la dificultad de establecer un orden determinado sin realizar referencias cruzadas a elementos o procesos no definidos, estos son descritos a lo largo del Capítulo de forma paralela. Se recomienda una primera lectura total de la solución adoptada atendiendo a la definición de las partes y una segunda para poder comprender las relaciones entre ellas más fácilmente.*

### 8.1 Estructura

Se adjuntan como anexo los planos de la estructura modular realizada por Alberto Cancho Soler durante su estancia en prácticas en el IRS Lab.

### 8.2 Arquitectura de hardware

El BlueROV ha sido desarrollado como un kit que no incluye la parte electrónica. Un comprador del mismo adquiere las diferentes partes que conforman la estructura y un juego de seis propulsores y variadores de velocidad. El usuario es libre de seleccionar y montar la electrónica que desee. No obstante, la práctica totalidad de los poseedores de un BlueROV utiliza los mismos componentes de hardware, lo que ha motivado que algunos de ellos se conviertan en un estándar de facto en el mundo de los vehículos operados remotamente de todo tipo. La intención de este Proyecto no es cuestionar la selección de estos componentes, que cuentan con una amplia popularidad y una justificación más que válida frente a otras alternativas, sino adaptar la arquitectura de referencia a las necesidades específicas de integración de los dispositivos.



**Figura 8.1:** Diagrama de arquitectura de hardware de referencia del BlueROV 2

## 8.3 Componentes electrónicos

### 8.3.1 Propulsores



**Figura 8.2:** BlueRobotics T200

El T200 es un propulsor de alto rendimiento y bajo coste diseñado por BlueRobotics. Este contiene un motor sin escobillas aislado en su interior. Las tres fases se conectan a un variador de velocidad para que el propulsor pueda ser controlado. Según el fabricante, el voltaje más eficiente para alimentarlo es de 16 V.

El BlueROV tiene seis propulsores que pueden ser alimentados en un rango entre 6 V y 20 V. El consumo de estos aumenta con la profundidad del vehículo, debido a que para una misma orden de velocidad que envía el operador al ROV, un propulsor sometido a una presión superior necesita más par para alcanzar dicha velocidad con respecto a otro propulsor situado a una menor profundidad. La potencia máxima recomendada de operación es de 350 W (25 A a 20

V). Realizando los cálculos, seis propulsores requerirían 150 A para funcionar al límite de sus especificaciones. No obstante, durante las distintas pruebas realizadas en el rango de profundidad habitual de realización de los experimentos del grupo de investigación y realizando un control brusco, agresivo y multidireccional del vehículo, únicamente se ha observado un consumo nominal aproximado de 10 A con picos de hasta 20 A.

Los propulsores se conectan a los variadores de velocidad. En su condición de suministro estos no presentan los conectores tipo bala de 3,5 mm que son necesarios para ser conectados, por lo que se requiere realizar su soldadura. En un principio, el orden de conexión de las fases es indiferente: intercambiar dos de ellas hace que el propulsor gire en sentido inverso. Aunque por software se puede configurar el sentido de los propulsores, se recomienda utilizar el mismo criterio de conexión en todos ellos.

Según la posición del motor en el vehículo, el motor debe llevar una hélice preparada para girar en un determinado sentido. Las hélices de los dos motores situados en el lado derecho del BlueROV deben ser sustituidas por unas de sentido antihorario.

Empuje máximo de avance (16 V)	5,1 kgf
Empuje máximo de retroceso (16 V)	4,1 kgf
Empuje máximo de avance (12 V)	3,55 kgf
Empuje máximo de retroceso (12 V)	3,0 kgf
Empuje mínimo	0,01 kgf
Velocidad	300-3800 rpm
Voltaje de operación	6-20 V
Corriente máxima	25 A
Potencia máxima	350 W

**Tabla 8.1:** Características principales de los propulsores BlueRobotics T200

### 8.3.2 Variadores de velocidad



**Figura 8.3:** BlueRobotics Basic ESC R1 (Afro 30A Race Spec)

Los variadores de velocidad o ESCs (Electronic Speed Controller) de los que dispone el laboratorio son del modelo BlueRobotics Basic ESC R1, basados en el Afro 30A Race Spec, componente que cuenta con una popularidad elevada en el mundo del aeromodelismo. Permiten controlar la velocidad de los propulsores con hasta 30 A de intensidad por cada uno. Se conectan al módulo de potencia, a los propulsores y al controlador de vuelo. Este último controla mediante una señal modulada por ancho de pulso (PWM) la velocidad del motor conectado.

Del mismo modo que algunas de las populares placas de desarrollo electrónico Arduino, el diseño del variador de velocidad se basa en un microcontrolador Atmel de la familia AVR ATmega. El firmware se encuentra disponible en línea y puede ser modificado y actualizado por el usuario mediante un programador de microcontroladores. Este hecho permite optimizar, si se dispone de los conocimientos técnicos necesarios, el funcionamiento de los propulsores del ROV. Los variadores de BlueRobotics son suministrados con un firmware precargado que habilita la rotación de los motores en ambos sentidos.

La versión R1 ha sido descontinuada y para nuevos diseños compatibles se recomienda el modelo Basic ESC R3. Existe también una alternativa de gran interés consistente en unos variadores de velocidad desarrollados por BlueRobotics que son colocados en el propulsor, los BlueESC. La instalación de los propulsores con este tipo de variadores tendría las ventajas de no ocupar espacio en el cilindro principal, no aportar calor al mismo y contar con una mejor refrigeración, ya que estarían sumergidos en el agua. Sin embargo, a fecha de redacción del presente Proyecto, los mismos no se encuentran disponibles.

Para proceder a su instalación en el vehículo, se recomienda cortar el cable de alimentación positiva del variador.

Voltaje	6-17 V
Corriente	30 A
Conectores de potencia	3,55 kgf
Firmware	afro_nfet_besc30_r1.hex
Dimensiones	50 mm x 25 mm x 11 mm
Peso	27 g
Precio	25 €

**Tabla 8.2:** Características principales de los BlueRobotics Basic ESC R1

### 8.3.3 Controlador de vuelo

El controlador de vuelo es una placa electrónica que integra y a la que se le conectan diferentes sensores y actuadores que afectan al control del vehículo.

La Pixhawk es prácticamente el proyecto de hardware libre de referencia en placas controladoras de vuelo. Sobre ella se pueden ejecutar capas de software como PX4 o ArduPilot para disponer de las funciones de control básicas de un vehículo multirrotor, así como de piloto automático. Otro proyecto de hardware de uso extendido es ArduPilot Mega.

La placa disponible para montar en el BlueROV es la 3DR Pixhawk 1 (FMUv2), fabricada por 3D Robotics. Sin embargo, esta empresa ya no se dedica a la fabricación de hardware y para futuros





**Figura 8.4:** 3DR Pixhawk 1

diseños se recomienda utilizar la mRo Pixhawk (FMUv3), placa compatible fabricada por Mayan Robotics, y que además soluciona un error que limita la memoria flash que puede ser utilizada en el diseño original.

La placa Pixhawk se puede alimentar por el conector principal destinado a ello, por el raíl de conexión de servos y por el puerto USB, con un nivel de voltaje entre 4,1 V y 5,7 V. La alimentación primaria normalmente se realiza a través del conector de alimentación desde la salida que ofrece el módulo de potencia. La Pixhawk se puede alimentar en configuraciones más avanzadas para prevenir, por ejemplo, una caída de un vehículo aéreo ante un fallo de la fuente de alimentación principal. Sin embargo, esta función de seguridad no es crítica en un ROV, ya que si está bien ajustada su flotabilidad, asciende lentamente hacia la superficie sin provocar daños.

El controlador de vuelo Pixhawk dispone de una serie de LEDs que muestran el estado del dispositivo. Se considera de interés instalar además un zumbador, conectado a su respectivo puerto en la placa, para tener también información acústica del estado del controlador. Aunque bajo el agua es inservible, durante las tareas de configuración y calibración es de utilidad contar con este accesorio. En contraposición, la instalación del pulsador de seguridad que suele ser distribuido en los kits de electrónica que incorporan la placa Pixhawk no es de excesivo interés, ya que en principio con la solución adoptada el cilindro de electrónica permanece cerrado. Este es un pulsador que se utiliza en los vehículos aéreos para mantener inactivos los motores hasta que el usuario pulse el botón.

#### **8.3.4 Módulo de potencia**

El módulo de potencia es un componente con una doble funcionalidad: mide el voltaje de la batería y la corriente instantánea consumida y alimenta al controlador de vuelo con 5,37 V.

El módulo de alimentación disponible en el laboratorio es el 3DR Power Module, fabricado por 3D Robotics. Este modelo ha sido discontinuado y se recomienda utilizar para nuevos diseños el modelo actualizado, el mRo Classic Power Module, fabricado por Mayan Robotics y compatible con el primero.

La intensidad máxima del módulo es de 90 A. Sin embargo, la medición máxima de corriente que puede medir el módulo cuando está conectado a un controlador de vuelo Pixhawk es de 60 A. Los

Voltaje	4,8-5,4 V
Corriente	2,25 A máx.
SoC principal CPU RAM	STM32F427 180 MHz ARM Cortex M4 256 KB SRAM
SoC de seguridad CPU RAM	STM32F100 24 MHz ARM Cortex M3 8 KB SRAM
Sensores	Giróscopo ST Micro L3GD20H Acelerómetro / magnetómetro ST Micro LSM303D Acelerómetro / giróscopo Invensense MPU 60004 Barómetro MEAS MS5611
Dimensiones	50 mm x 16 mm x 82 mm
Peso	38 g
Precio	50 €

**Tabla 8.3:** Características principales del controlador de vuelo 3DR Pixhawk

conectores modelo XT60 que incorpora también son de 60 A, por lo que esta es considerada la intensidad máxima soportada por el módulo.

Voltaje	4,5-18 V
Corriente máxima	60 A
Dimensiones	n.d. (23 mm x 21 mm x 10 mm)
Peso	19 g
Precio	25,90 €

**Tabla 8.4:** Características principales del módulo de potencia 3DR Power Module

### 8.3.5 Placa computadora

Una placa computadora u ordenador de placa reducida es un ordenador en una tarjeta de reducidas dimensiones. Los modelos Raspberry Pi son las placas computadoras más populares entre los aficionados a la electrónica y la informática. Su salida al mercado supuso una auténtica revolución debido a su precio de 35 \$ marcado por su objetivo de hacer accesible la computación para todo el mundo. Existen otras alternativas con diferentes características, como la BeagleBone Black o la Orange Pi.

La placa computadora utilizada en el diseño de referencia del BlueROV y de la que dispone el IRS Lab es una Raspberry Pi 2 modelo B. Sin embargo, dado que la modificación proyectada requiere que este componente se encargue además de gestionar las comunicaciones con los diferentes dispositivos, se decide sustituirlo por un modelo más moderno.

El modelo 3 B+ es la placa computadora Raspberry Pi de lanzamiento más reciente. Es ligeramente más potente que el modelo 3 B, debido al incremento de velocidad de reloj de la CPU. Su principal



**Figura 8.5:** 3DR Power Module



**Figura 8.6:** Raspberry Pi 3 modelo B

innovación respecto a este fue la mejora de la conectividad, que añadió soporte para Gigabit Ethernet (aunque limitado a la velocidad del estándar USB 2.0), WiFi 802.11.ac y Bluetooth 4.2.

Sin embargo, la última versión de la placa Raspberry Pi no es compatible por el momento con el proyecto ArduSub, el software más utilizado con el BlueROV, por lo que se descarta su uso. La umbilical de comunicación del ROV no es Gigabit Ethernet puesto que uno de los pares trenzados del cable se utiliza para transmitir la señal del localizador del sistema GPS, y el resto de mejoras de conectividad respecto al modelo anterior no son relevantes. Por lo tanto, el modelo 3 B es considerado el más adecuado para el vehículo.

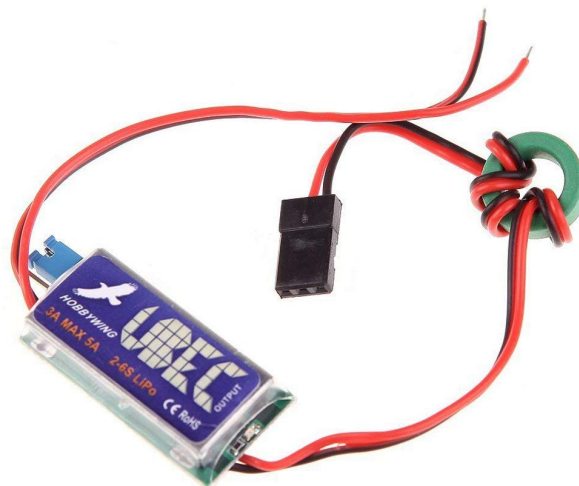
Durante la evaluación de los prototipos, la carga de trabajo de la placa computadora Raspberry Pi 2 utilizada fue monitorizada y esta no presentaba ningún problema de saturación de la potencia de procesamiento. La placa que conformaba la electrónica auxiliar tampoco tenía problemas para gestionar adecuadamente la comunicación con el módem de radiofrecuencia. El modelo 3 B se considera un 40 % más potente que su predecesor, por lo que se espera que funcione de forma fluida a pesar de que se encargue del control y de la comunicación del vehículo de forma simultánea. La actualización permite además configurar un punto de acceso WiFi que puede ser empleado para

	Raspberry Pi 2 B	Raspberry Pi 3 B	Raspberry Pi 3 B+
SoC	Broadcom BCM2836	Broadcom BCM2837	Broadcom BCM2837
CPU	900 MHz 32-bit quad-core ARM Cortex-A7 (ARMv7)	1,2 GHZ 64-bit quad-core Cortex-A53 (ARMv8)	1,4 GHZ 64-bit quad-core Cortex-A53 (ARMv8)
GPU	Broadcom VideoCore IV	Broadcom VideoCore IV	Broadcom VideoCore IV
RAM	1GB LPDDR2 SDRAM	1GB LPDDR2 SDRAM	1GB LPDDR2 SDRAM
Red	Fast Ethernet	Fast Ethernet	Gigabit Ethernet USB 2.0
WiFi	-	802.11 b/g/n	802.11.b/g/n/ac
Bluetooth	-	Clase 4.1	Clase 4.2
Alimentación	5V 2A	5V 2,5 A	5V 2,5A
Dimensiones	85 mm x 56 mm x 17 mm	85 mm x 56 mm x 16 mm	85 mm x 56 mm x 16 mm
Soportada por ArduSub	Sí	Sí	No
Precio	31,90 €	29,47 €	29,47 €

**Tabla 8.5:** Comparativa de placas computadoras Raspberry Pi

ajustar y calibrar el software del robot cuando no se encuentre sumergido, evitando el uso del cable umbilical de comunicación para esta tarea.

### 8.3.6 Regulador de voltaje



**Figura 8.7:** Hobbywing UBEC 3A

El dispositivo seleccionado para poder alimentar la placa computadora Raspberry Pi es el Hobbywing UBEC de 3A (Universal Battery Eliminator Circuit). Este componente es un regulador de tensión conmutado que ofrece una salida de 5 V y 3A o 6 V y 3 A. El voltaje de salida se selecciona mediante un jumper. Se debe configurar en 5 V.

Voltaje y corriente de salida	5 V @ 3 A / 6 V @ 3 A
Voltaje de entrada	5,5-26 V
Rizado	<50 mV (pico a pico, con entrada de 12V/2A)
Tamaño	43 mm x 17 mm x 17 mm
Peso	11 g
Precio	8 €

**Tabla 8.6:** Características principales del UBEC

La placa Raspberry Pi tiene un conjunto de entradas y salidas de propósito general (GPIO). Para alimentarla se conecta la salida del UBEC a los pines de 5 V y GND.

### 8.3.7 *Acumulador*

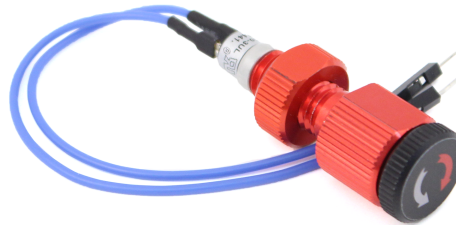


**Figura 8.8:** Multistar High Capacity 10000mAh 4S 12C Multi-Rotor Lipo Pack

El diseño original del BlueROV no tiene batería, por lo que en principio el vehículo debe ser alimentado mediante un cable umbilical. No obstante, una de las modificaciones más habituales de los usuarios de este ROV es instalar una batería de aeromodelismo en el cilindro principal. El primer prototipo realizado cuenta con la batería comercial con más autonomía que ha sido testeada con éxito en el BlueROV, una Turnigy Multistar 4S de 10 Ah. Sin embargo, esta entra en el cilindro principal de forma forzada, ocupando prácticamente la mitad inferior del mismo y dificultando que otros accesorios puedan ser colocados.

Con la intención de ampliar la autonomía del vehículo, se diseña una batería formada por celdas de iones de litio tipo 18650. Este tipo de celdas es el que más densidad de carga tiene, por lo que se consigue reducir el tamaño de la batería y aumentar la autonomía del vehículo.

### 8.3.8 Conmutador



**Figura 8.9:** Conmutador

El conmutador será el dispositivo encargado de encender y apagar el vehículo y todos los sistemas. Diseñado por BlueRobotics, se instala como un penetrador de cables, en la tapa del cilindro. Se basa en el conmutador Grayhill 30-3UL. Soporta hasta 120 V y 5 A en corriente alterna. El uso en este caso será a 16,8 V como máximo, con una corriente aproximada de 0,2 A, ya que la bobina del relé al que va conectado presenta una resistencia de 80 ohm. El otro contacto deberá ser conectado detrás del fusible.

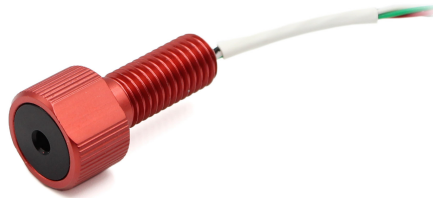
Rango de voltaje de uso	10-16 V
Corriente nominal de operación	150 mA
Tamaño del cable	80 Ohm
Profundidad	1000 m
Vida útil	6000 operaciones
Precio	14 €

**Tabla 8.7:** Características principales del conmutador de BlueRobotics

### 8.3.9 Sensor de presión y temperatura

El sensor de presión y temperatura es un elemento necesario para determinar la profundidad del vehículo. De la misma forma que el conmutador, se instala sobre la tapa del cilindro como un penetrador más.

El modelo utilizado en los prototipos es el BlueRobotics Bar30, que incorpora un circuito integrado Measurement Specialties MS5837-30BA y está capacitado para operar hasta 30 bares (300 m de profundidad) con una resolución de 0.2 mbar (2 mm). Se puede medir también con él la temperatura, con un grado Celsius de precisión. No obstante, el modelo recomendado para nuevos



**Figura 8.10:** Sensor de presión y temperatura BlueRobotics Bar02

diseños es el nuevo sensor de BlueRobotics modelo Bar02, con una resolución mejorada de 0.16 mm.

Presión máxima	10-16 V
Presión de operación estándar	0,3-1,2 bar
Presión de operación extendida	0-2 bar
Exactitud (presión)	+/- 4 bar
Exactitud (temperatura)	+/- 2 C
Precio	14 €

**Tabla 8.8:** Características principales del sensor de presión y temperatura BlueRobotics Bar02

### 8.3.10 Sensor de fugas

El sensor de fugas es un accesorio de instalación opcional. Consiste en una placa electrónica a la que se le conectan cuatro sondas que se colocan repartidas a lo largo de todo el cilindro. Su función es alertar al operador, tanto de forma visual como acústica a través del software de control, en el caso de que haya una entrada de agua en el cilindro y las sondas la detecten.

Aunque no es un componente obligatorio del BlueROV, se recomienda su implementación por la seguridad que aporta al vehículo. Durante las pruebas experimentales con los prototipos hubo incidentes relacionados con la pérdida de estanqueidad del cilindro de electrónica, por lo que la instalación de este dispositivo resulta de gran interés.

### 8.3.11 Relé



**Figura 8.11:** Panasonic CB1aH-12V

Para permitir la conexión y desconexión del vehículo, se instalará un relé de un único polo y vía (SPST), normalmente abierto.

Encontrar un relé de tamaño reducido que sea capaz de transportar 60 A a 16,8 V no es tarea fácil. Se selecciona entre los disponibles del proveedor de componentes electrónicos RS Amidata, por ser proveedor del IRS Lab, el relé de automoción Panasonic CB1aH-12V, debido a sus 40 A de corriente máxima, su reducido tamaño, su rango de tensión de alimentación de la bobina y su precio económico.

Estos dispositivos normalmente se insertan en unos zócalos, pero al estar limitado el espacio en el cilindro, en este caso se suelda directamente el cableado a los terminales.

Disposición de los contactos	Forma A (SPST normalmente abierto)
Corriente de conmutación	40 A 14 V 85 C
Voltaje nominal de la bobina	12 V
Rango de voltaje de operación	10-16 V
Corriente nominal de operación	150 mA
Resistencia de la bobina	80 Ohm
Potencia nominal de operación	1.8 W
Rango de voltaje de uso	12-16 V
Vida mínima esperada	10E4 ciclos a 120 cpm
Velocidad de operación máxima	15 cpm
Dimensiones	29,5 mm x 25 mm x 22
Peso	33 g
Precio	4,82 €

**Tabla 8.9:** Características principales del relé

El circuito de activación utiliza el conmutador sumergible de BlueRobotics, que se conecta a la bobina del relé y a la batería, de forma que al cerrarse permite el encendido y apagado del vehículo. Al no ser un circuito controlado electrónicamente, no se considera necesario el uso de un diodo flyback para la protección contra picos de tensión generados por la bobina del relé.



### 8.3.12 Fusible

Como el consumo de los propulsores del vehículo está relacionado con su profundidad, se requiere la instalación de un fusible para proteger los componentes y los conductores de la cadena de potencia, formada por los cables, los conectores, la batería, el relé, el módulo de alimentación, los variadores de velocidad y los propulsores.

Realizando un análisis de la cadena de potencia, los propulsores consumen como máximo 25 A cada uno (150 A en total) y los variadores de velocidad ofrecen 30 A cada uno para los propulsores. No obstante, como ya se ha mencionado, el consumo nominal total del vehículo a la profundidad de operación habitual se considera de 10 A (25 A de pico). Tanto la corriente máxima de conmutación del relé como la de suministro de la batería es de 40 A, siendo estos elementos los que constituyen el «cuello de botella» de la cadena de potencia y, por tanto, los que limitan la intensidad admisible del conjunto.

Se propone la instalación de un fusible que permita operar al BlueROV a una profundidad mayor de la de realización de los experimentos, pero que corte la alimentación en un segundo si la intensidad excede de los 40 A soportados por la cadena de potencia. Según la gráfica característica tiempo-intensidad de su hoja de datos, el modelo Littelfuse 0287020 de 20A de intensidad nominal se funde en 0,8 s a 40 A y en 0,2 s a 60 A y en menos de 0,1 s para corrientes superiores a 90 A. Se considera estos tiempos protegen adecuadamente al conjunto de dispositivos de la cadena de potencia.

El fusible es acomodado en un portafusibles FHAC0002, cuyos cables son de 3,3 mm<sup>2</sup> (12AWG). El portafusibles se conecta al borne positivo (por convención) del acumulador. El otro extremo lo hace en uno de los contactos de transmisión de potencia del relé.

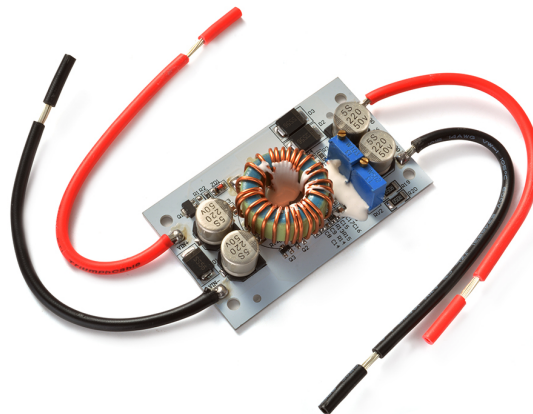
Voltaje nominal	12 V
Poder de corte	10 mA
Corriente nominal	24 V
I <sup>2</sup> t	520 A <sup>2</sup> s
Cableado	85 %
Dimensiones	33 mm x 25 mm x 15 mm
Precio del fusible	0,22 €
Precio del portafusibles	3,02 €

**Tabla 8.10:** Características principales del fusible 0287020 y portafusibles FHAC0002 de Littelfuse

### 8.3.13 Convertidor CC a CC

Para alimentar al módem de radiofrecuencia se necesita una tensión entre 24 V y 28 V. El módem acústico tiene un rango de alimentación de 12 V a 48 V. Como en el vehículo no se precisa la instalación de los dos módems a la vez y ambos se comunican por RS-232, se decide utilizar un único conector en la tapa del cilindro de electrónica para realizar la conexión con el dispositivo que sea montado en cada experimento.

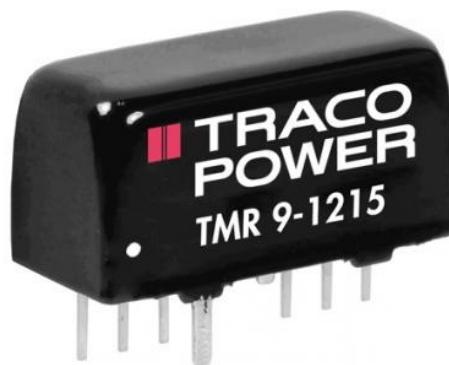
El módem de radiofrecuencia tiene el rango de alimentación más limitado, por lo que se selecciona su tensión mínima, 24 V. Este nivel de tensión se considera el más adecuado ya que existe una gran



**Figura 8.12:** Módulo convertidor CC a CC

variedad de dispositivos que utilizan el mismo, y posibilita que en el futuro puedan ser conectados al vehículo otros dispositivos diferentes.

La potencia máxima consumida por el módulo acústico es de 7,92W en transmisión (330 mA a 24 V). Sin embargo, la potencia máxima del módem de radiofrecuencia es desconocida: existen múltiples versiones de su hoja de datos con discrepancias entre ellas, tanto en el rango de alimentación como en la intensidad consumida. Las hojas de datos las facilita el distribuidor, están marcadas como confidenciales y por ello no pueden ser adjuntadas. Se decide para la realización de este Proyecto tomar como referencia los valores de las hojas de datos que se suministran con los módems junto con diversos certificados de pruebas realizadas, que además son de los más restrictivos: rango de alimentación entre 24 V y 28 V y corriente de hasta 5 A.



**Figura 8.13:** Convertidor CC a CC aislado TRACO Power TEL 8-1215

A pesar de que en ninguna prueba realizada con el módem de radiofrecuencia se ha observado un consumo superior a 1 A y de que en una de las versiones de hoja de datos se afirma que los

módems consumen 7,5 W en transmisión y 0,25 W en recepción (300 mA y 10 mA respectivamente a 24 V), se mantiene el criterio de diseño de 5 A de intensidad máxima por ser lo establecido en la hoja de datos considerada. Si estos valores descartados fuesen considerados ciertos, se podría instalar un convertidor CC a CC aislado como el TRACO Power TEL 8-1215 que, como reza la descripción de su hoja de datos, es un recurso económico para aplicaciones donde el espacio es crítico.

Voltaje de entrada	12 V
Intensidad de entrada típica	10 mA
Voltaje de salida	24 V
Intensidad de salida máxima	335 mA
Eficiencia típica	85 %
Exactitud del voltaje	+2 %
Rizado máximo	50 mVp-p
Dimensiones	23.8 mm x 13.7 mm x 8 mm
Precio	23,13 €

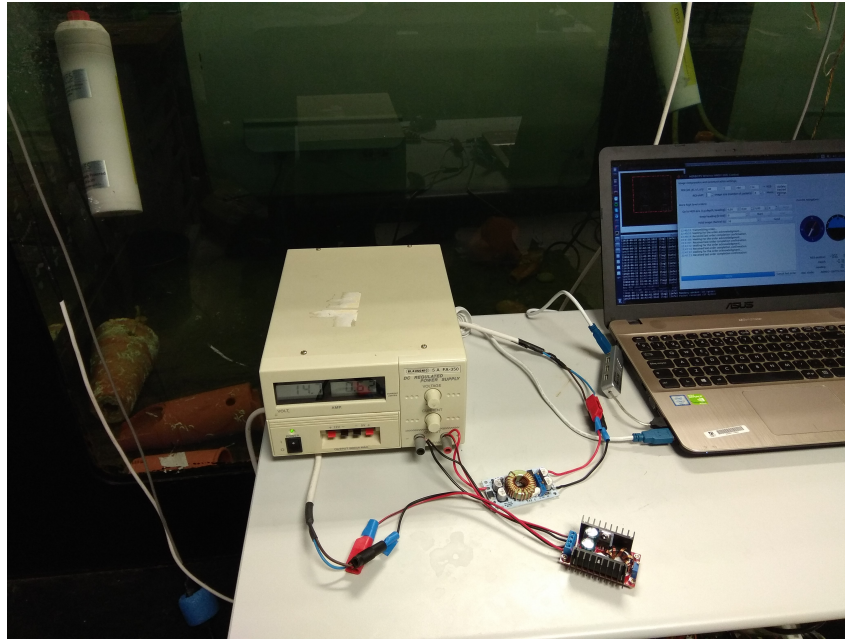
**Tabla 8.11:** Características principales del convertidor CC a CC aislado TRACO Power TEL 8-1215

El requisito de intensidad de 5 A supone un reto difícil de diseño, ya que los conversores de CC a CC aislados que en un principio son los más adecuados para realizar esta tarea son dispositivos con un tamaño superior al del cilindro de electrónica. Se seleccionan finalmente dos módulos basados en un convertidor elevador de 150 W y 250 W para ser evaluados experimentalmente con el módem.

	Módulo 250 W	Módulo 150 W
Potencia máxima	250 W	150 W
Voltaje de entrada	8,5-48 V	10-32 V
Voltaje de salida	10-50 V	14-35 V
Intensidad de salida máxima		
Con disipador	10 A	n.d
Sin disipador	6 A	n.d
Potencia de salida máxima		
Con disipador	n.d.	150 W
Sin disipador	n.d.	100 W
Eficiencia	96 %	94 %
Dimensiones	70 mm x 46 mm x 13 mm	n.d.
Precio	7,86 €	

**Tabla 8.12:** Características principales del módulo convertidor CC a CC

Se realizan pruebas de estrés con los módulos y el módem de radiofrecuencia para comprobar su apto funcionamiento. Del mismo modo que en las anteriores experiencias, no se observa un consumo elevado del dispositivo, y los módulos no incrementan en absoluto su temperatura. Se comprueba que al variar la tensión de la entrada entre 12 V y 16,8 V, el rango en el que oscila



**Figura 8.14:** Pruebas de comunicación por radiofrecuencia con los convertidores CC a CC

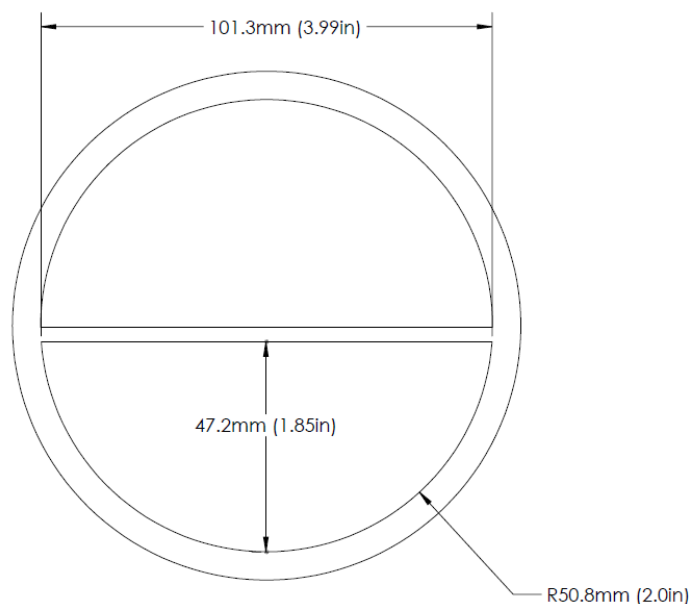
la tensión del acumulador en función de su carga, los conversores mantienen la tensión de salida estable, que únicamente depende del ajuste realizado mediante los potenciómetros disponibles para ello y no del voltaje de entrada.

Se selecciona finalmente el módulo de 250W ya que es más pequeño al no tener disipador, que no es necesario para la intensidad a la que va a trabajar. Además, este módulo presenta una protección de la entrada contra cortocircuitos y polaridad revertida, por lo que se considera más seguro. También puede funcionar como fuente de corriente en un rango entre 0,2 y 8 A. Se realiza el ajuste de la tensión de salida a 24 V.

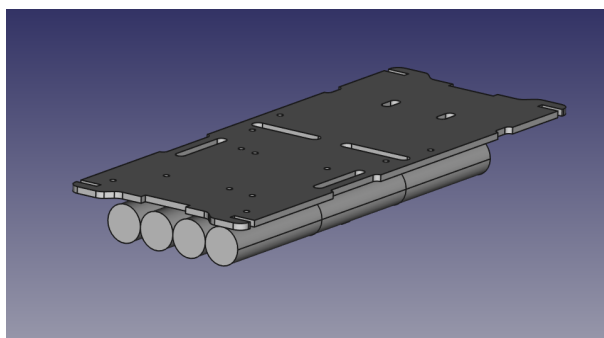
La entrada del dispositivo se conecta a los bornes de distribución de la alimentación mediante terminales FASTON, y la salida se suelda al conector de los dispositivos RS-232.

## 8.4 Diseño del acumulador

Como el voltaje recomendado de los propulsores es de 16 V y el máximo permitido por el módulo de potencia es de 18V se plantea una batería de cuatro bloques de celdas en serie. Una celda 18650 tiene 18 mm de diámetro y 65 mm de largo. Partiendo de las dimensiones del cilindro principal con la bandeja de electrónica instalada, se busca una distribución para encajar en su parte más amplia el mayor número de celdas posibles. A pesar de que pueden ser ubicadas hasta 24 celdas, no se encuentra una forma simple de crear cuatro paquetes de seis celdas en paralelo, por lo que esta configuración se descarta. Finalmente se disponen cuatro paquetes de cuatro celdas, formando una batería de 16 celdas y dejando bastante espacio para el resto de electrónica del cilindro. Esta configuración se conoce como 4S4P (cuatro serie cuatro paralelo) y su voltaje variará durante la carga entre 16,8 V y 12 V.



**Figura 8.15:** Dimensiones del cilindro principal con la bandeja de electrónica instalada

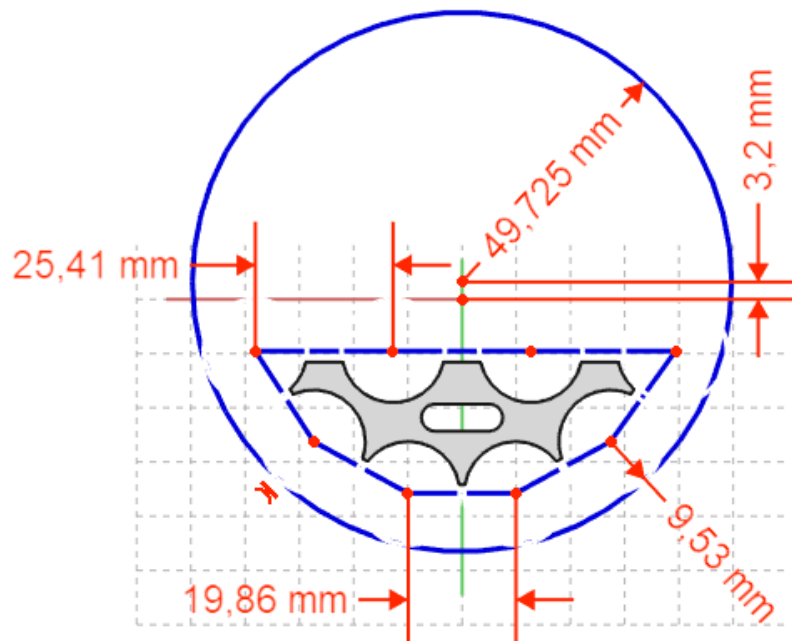


**Figura 8.16:** Detalle del tamaño relativo entre las celdas y la bandeja de electrónica

Las celdas se ubican en el cilindro mediante una pieza impresa en 3D que las separa. La distribución de las celdas que quedan físicamente situadas en paralelo se optimiza para que sea lo más amplia y equidistante posible.

Existe una gran variedad de celdas en el mercado. Sin embargo, muchas de ellas son anunciadas con unas características que no suelen cumplirse en condiciones de utilización reales, por lo que es importante verificar mediante experimentos el funcionamiento de una celda determinada antes de realizar un proyecto con ella. Las empresas cuyas celdas son consideradas las más fiables del mercado son Sony, Panasonic, LG Chem y Samsung.

La segunda versión del BlueROV incluye una batería formada por celdas INR18650-30Q de Samsung. Estas celdas son un buen punto de partida, ya que han sido testeadas en una aplicación idéntica. Sin embargo, en la Universitat Jaume I fue desarrollada recientemente una motocicleta eléctrica de competición por el equipo de estudiantes UJI electric Racing Team, proyecto que incluía un amplio análisis de celdas para la elaboración de un acumulador (Oliver Blasco 2016). El prototipo tenía unos condicionantes de diseño eléctricos similares a los del ROV, requiriendo una batería con una alta densidad energética, autonomía y gran capacidad de descarga. El



**Figura 8.17:** Detalle de la disposición de celdas

modelo de celda seleccionado fue el INR18650 MH1 de LG, y fue sometido a múltiples pruebas que confirmaron su buen desempeño. El comportamiento de las celdas también fue excelente en competición, siendo uno de los factores claves en el tercer puesto en carrera que el equipo logró en Motostudent 2016.

	INR18650-30Q	INR18650 MH1
Química	NCA	NCA
Voltaje nominal	3,6 V	3,6 V
Voltaje máximo	4,2 V	4,2 +- 0,005 V
Capacidad nominal	3 Ah	3,2 Ah
Corriente continua de descarga máxima	15 A (5C)	10 A
Corriente instantánea de descarga máxima	22 A (7,3C)	n.d.
Voltaje mínimo de descarga	2,5 V	2,5 V
Corriente de carga estándar	1,5 A (0,5C)	1,55 A (0,5C)
Corriente de carga rápida	4 A	3,1 A (1C)
Peso	n.d.	49 g
Precio	3,14 \$	4,41 \$

**Tabla 8.13:** Comparativa de las celdas Samsung INR18650-30Q y LG MH118650

Entre los dos modelos preseleccionados, la celda de LG tiene una menor corriente de descarga máxima. Sin embargo, como el consumo máximo de los motores experimentado es de 25 A y este supone la principal carga eléctrica del vehículo, la capacidad de descarga de la celda se considera

suficiente ya que el conjunto en configuración paralela soporta 40 A. Se selecciona esta celda ya que el proyectista ya ha trabajado con ella anteriormente.

## 8.5 Disposición de los componentes

En el Plano 1 se encuentra el diagrama de disposición de los componentes.

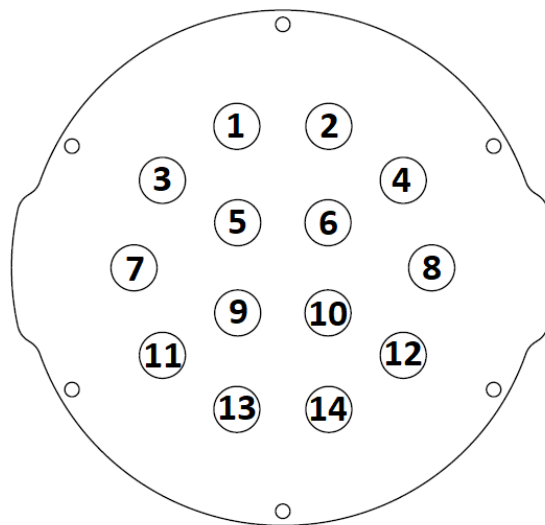
## 8.6 Esquema de conexiones

En el Plano 2 se encuentra el diagrama de conexión de los componentes.

## 8.7 Tapa del cilindro de electrónica

### 8.7.1 Distribución de penetradores

Con el fin de mantener un orden en la distribución de cables al cerrar la tapa del cilindro de electrónica, se requiere distribuir los penetradores en ella con una configuración que minimice el recorrido de los cables. Se propone la siguiente distribución, de acuerdo con la disposición de los componentes en el cilindro:



**Figura 8.18:** Numeración de referencia de los agujeros de la tapa

1. Sensor de presión
2. Conector Ethernet
3. Conector de par trenzado
4. Conmutador
5. Propulsor

6. Propulsor
7. Tapón
8. Conector USB
9. Propulsor
10. Propulsor
11. Conector RS-232
12. Propulsor
13. Propulsor
14. Conector de carga

### **8.7.2 Mecanizado**

Como los conectores pasamuros tienen un diámetro superior a los penetradores de BlueRobotics, los agujeros de la tapa del cilindro de electrónica tienen que ser ampliados. La rosca de los conectores pasamuros es de tipo 7/16-20 UNF-2A, que en el sistema métrico equivale a una rosca M12 x 1.75 mm.

La tapa se realiza de forma manual a partir de la pieza original de BlueRobotics con un taladro de columna y una broca para metales de 12 mm.

### **8.7.3 Instalación de conectores**

Todos los cables deben ser recortados a la distancia adecuada, evitando que al cerrar el cilindro haya un exceso de cables enrollados sobre sí mismos, pero permitiendo la apertura del cilindro. Se recomienda una distancia de entre 5 y 10 cm superior a la necesaria para que el cable llegue al sitio destinado con la tapa cerrada.

La asignación de patillaje debe ser idéntica en los conectores que se conecten entre sí.

#### *Propulsor*

- Pasar el cable del propulsor por el penetrador correspondiente.
- Soldar tres conectores Bullet hembra de 3,5 mm incluidos con los variadores de velocidad a las tres fases del propulsor, aislando el exceso de cable pelado con tubo termorretráctil.
- Aplicar resina epoxy en el penetrador.
- Instalar el penetrador y conectar las fases del propulsor al variador de velocidad correspondiente.



*Conector de carga*

- Instalar un conector MC-BH-F de 5 pines aplicando grasa de silicona.
- Cortar los cables del conector a la distancia adecuada y soldar a los bornes de la batería.

*Conector Ethernet*

- Instalar un conector MC-BH-F de 8 pines aplicando grasa de silicona.
- Cortar los cables del conector a la distancia adecuada y crimpar un conector RJ-45 macho. No crimpar uno de los pares de transmisión Ethernet.

*Conector USB*

- Instalar un conector MC-BH-F de 7 pines aplicando grasa de silicona.
- Cortar los cables a la distancia adecuada y soldar a un conector USB tipo A macho.

*Conector RS-232*

- Instalar un conector MC-BH-F de 11 pines aplicando grasa de silicona.
- Cortar los cables a la distancia adecuada y soldar a un conector DB9 hembra.

*Conector de par trenzado*

- Instalar un conector MC-BH-F de 4 pines aplicando grasa de silicona.
- Cortar los cables a la distancia adecuada y soldar al par trenzado de transmisión no crimpado del conector Ethernet.

*Conmutador*

- Instalar el conmutador aplicando grasa de silicona.
- Cortar los cables a la distancia adecuada y soldar al cable de tensión positiva, detrás del fusible, uno de los extremos. Soldar el otro extremo a cualquier contacto de la bobina del relé.
- Soldar un cable entre el otro contacto de la bobina del relé y el cable de masa de la batería.

*Sensor de presión*

- Instalar el sensor de presión aplicando grasa de silicona.
- Conectar al puerto I2C del controlador de vuelo Pixhawk.

*Tapón*

- Instalar el tapón aplicando grasa de silicona.

## 8.8 Análisis de resultados



**Figura 8.19:** Integración de dispositivos en el ROV<sup>1</sup>

Con los primeros pasos realizados se instalan con éxito varios dispositivos de experimentación subacuática en un vehículo operado remotamente.

En una segunda fase, el Proyecto propone reducir el tamaño del vehículo integrando toda la electrónica necesaria en un único cilindro, extender su autonomía del vehículo mediante el diseño de un acumulador personalizado y facilitar su puesta en marcha gracias a la instalación de un relé.

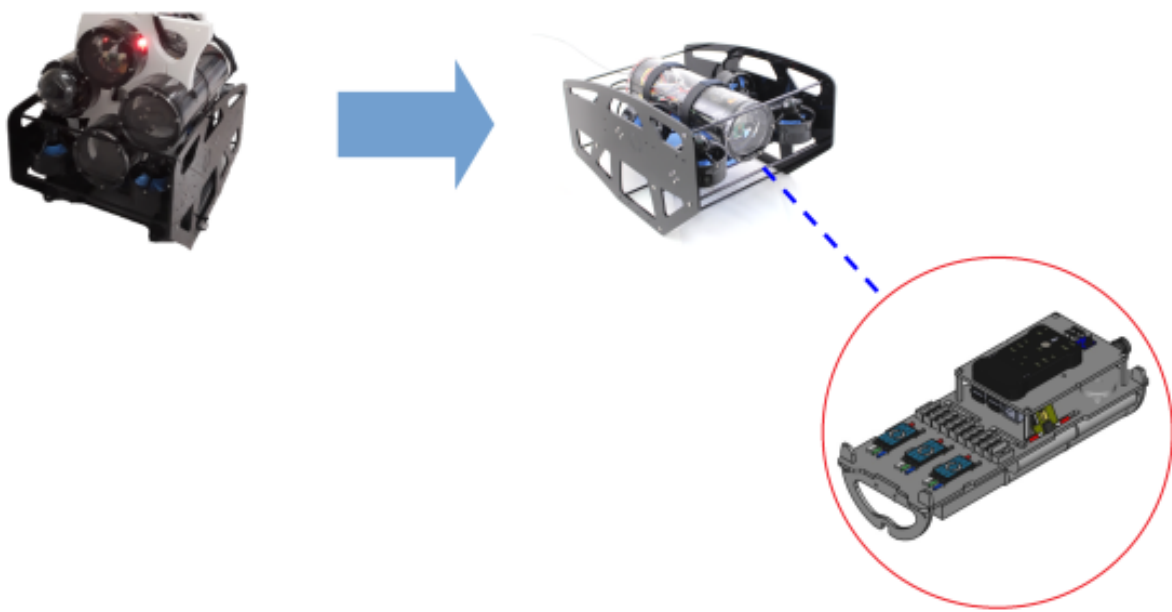
Los objetivos de la modificación del ROV son los siguientes:

- Integrar dos baterías de litio en el vehículo para dotarlo de autonomía.
- Instalar una cámara adicional para exploración submarina.
- Instalar un módem de comunicación subacuática por radiofrecuencia, modelo WFS S100.
- Instalar un módem de comunicación subacuática por ultrasonidos, modelo Trittech Micron Data Modem.
- Instalar un sistema de posicionamiento GPS subacuático, del fabricante Water Linked.

La solución desarrollada permite cumplir los objetivos con los requisitos de funcionalidad, modularidad, operabilidad, tamaño, resistencia, compatibilidad, viabilidad económica y autonomía:

- Los prototipos son funcionales en los escenarios requeridos.

<sup>1</sup>Imagen del BlueROV totalmente ensamblado con los dispositivos por cortesía de Diego Centelles.



**Figura 8.20:** Reducción del tamaño de la solución

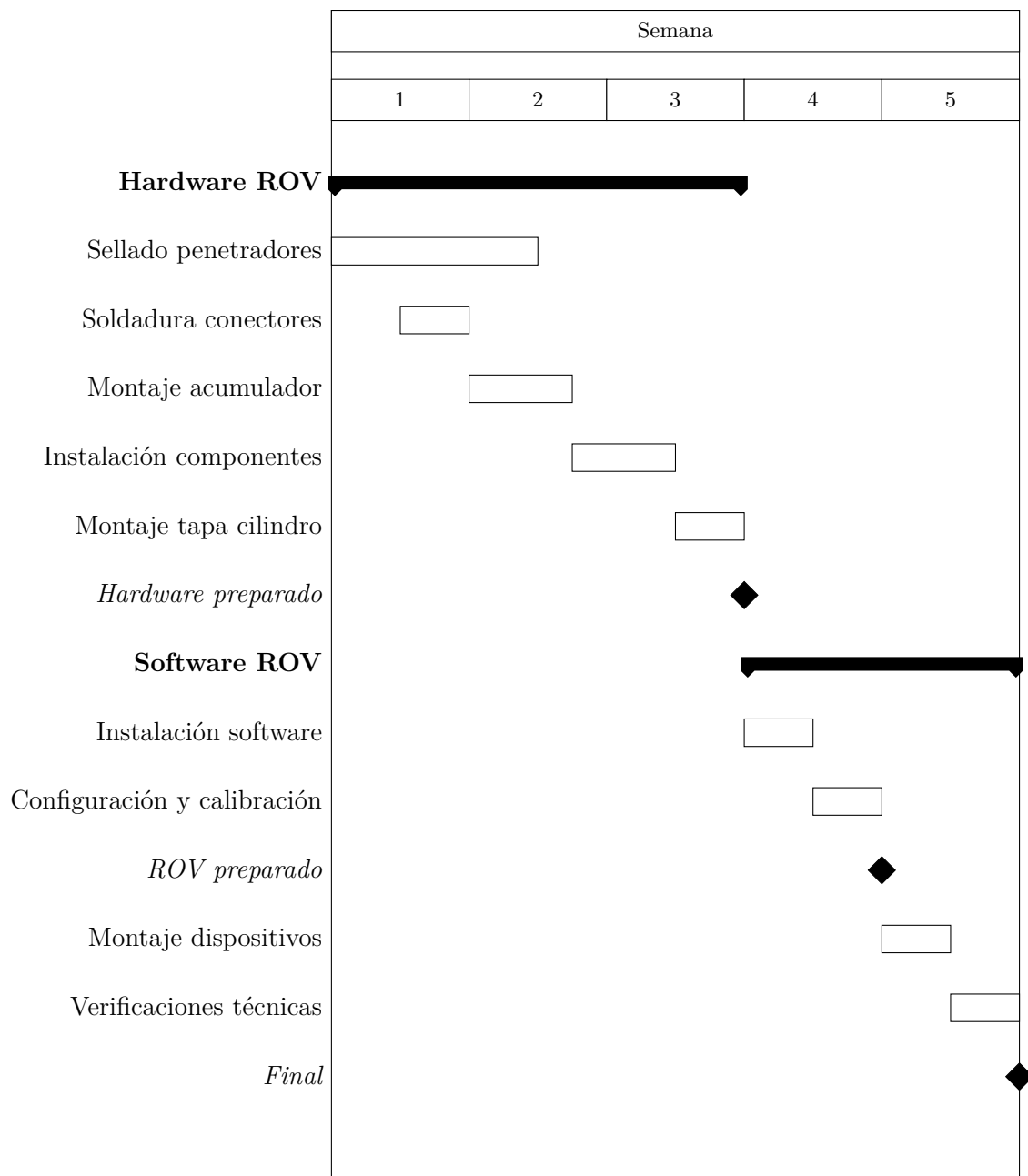
- Los diferentes sistemas pueden ser conectados y desconectados del vehículo, gracias a los conectores instalados.
- El ROV no necesita desmontarse para ser armado o cargado. Mediante el circuito de encendido proyectado, en un instante está preparado para ser operado.
- A pesar del incremento del número de componentes electrónicos para poder integrar los distintos instrumentos, el ROV mantiene su tamaño original.
- Los cables y conectores de los elementos utilizados en el exterior del cilindro están preparados para resistir la corrosión.
- La instalación de los mismos conectores que utiliza el grupo de investigación asegura la compatibilidad con otros sistemas.
- El acumulador personalizado mejora la autonomía original del vehículo.



## Capítulo 9

# Planificación









## Capítulo 10

# Orden de prioridad entre los documentos

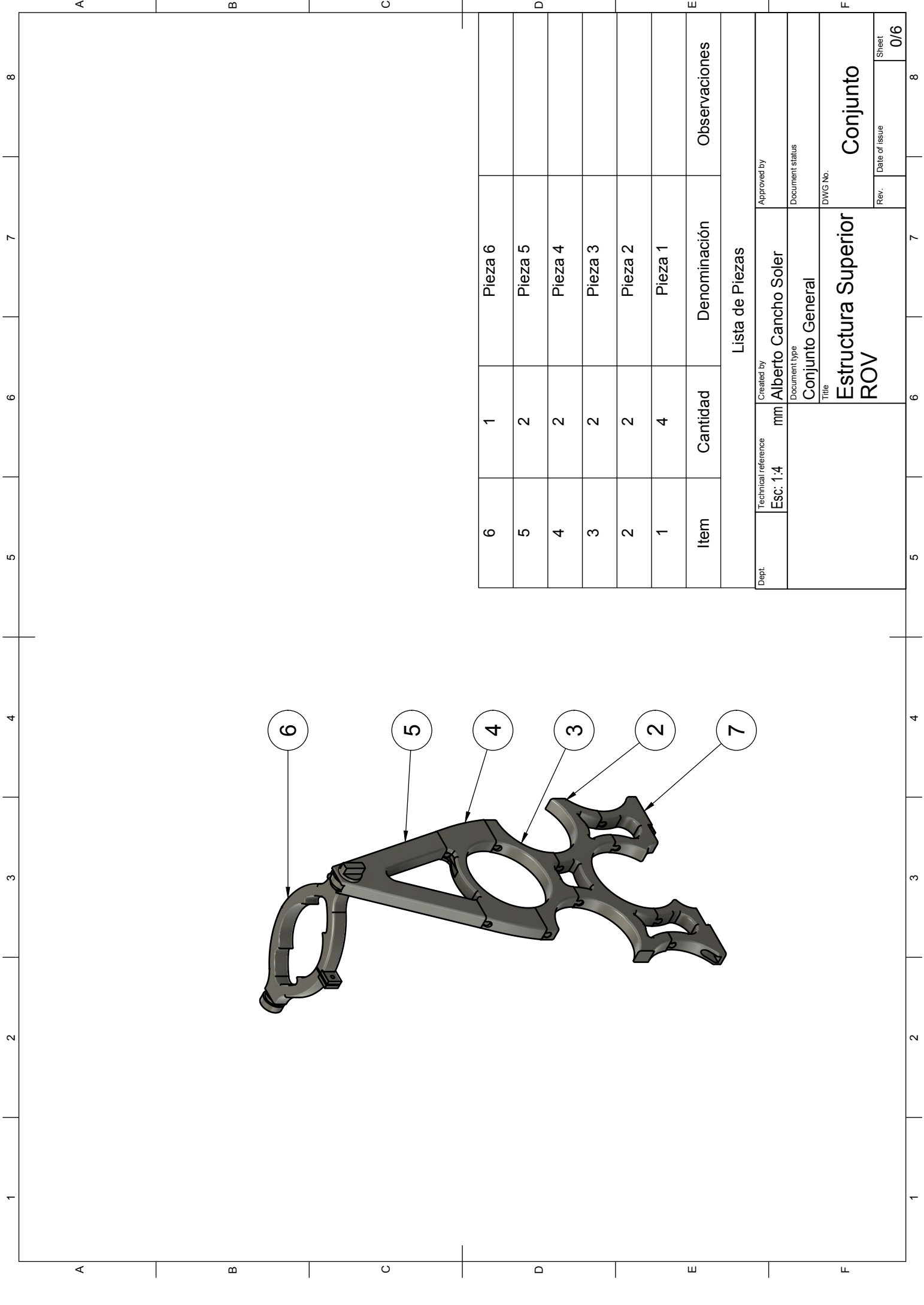
1. Planos
2. Pliego de condiciones
3. Presupuesto
4. Memoria



**Parte III**

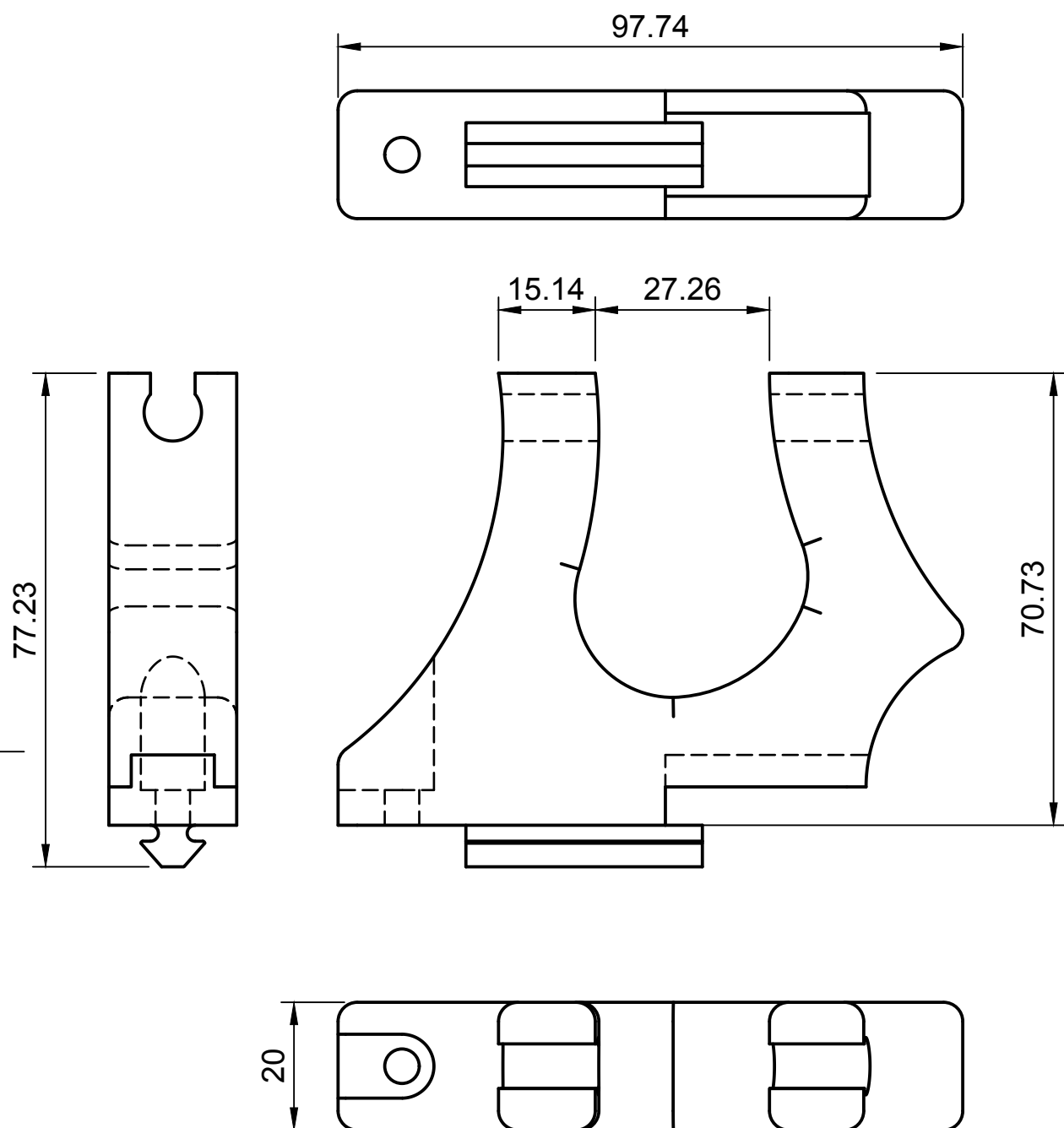
**Anexos**





6	1	Pieza 6	
5	2	Pieza 5	
4	2	Pieza 4	
3	2	Pieza 3	
2	2	Pieza 2	
1	4	Pieza 1	
Item	Cantidad	Denominación	Observaciones
Lista de Piezas			
Dept.	Technical reference Esc: 1:4	Created by mm Alberto Cancho Soler	Approved by
		Document type Conjunto General	Document status
		Title Estructura Superior ROV	DWG No.
		Rev.	Date of issue
		Conjunto	
		Sheet	0/6





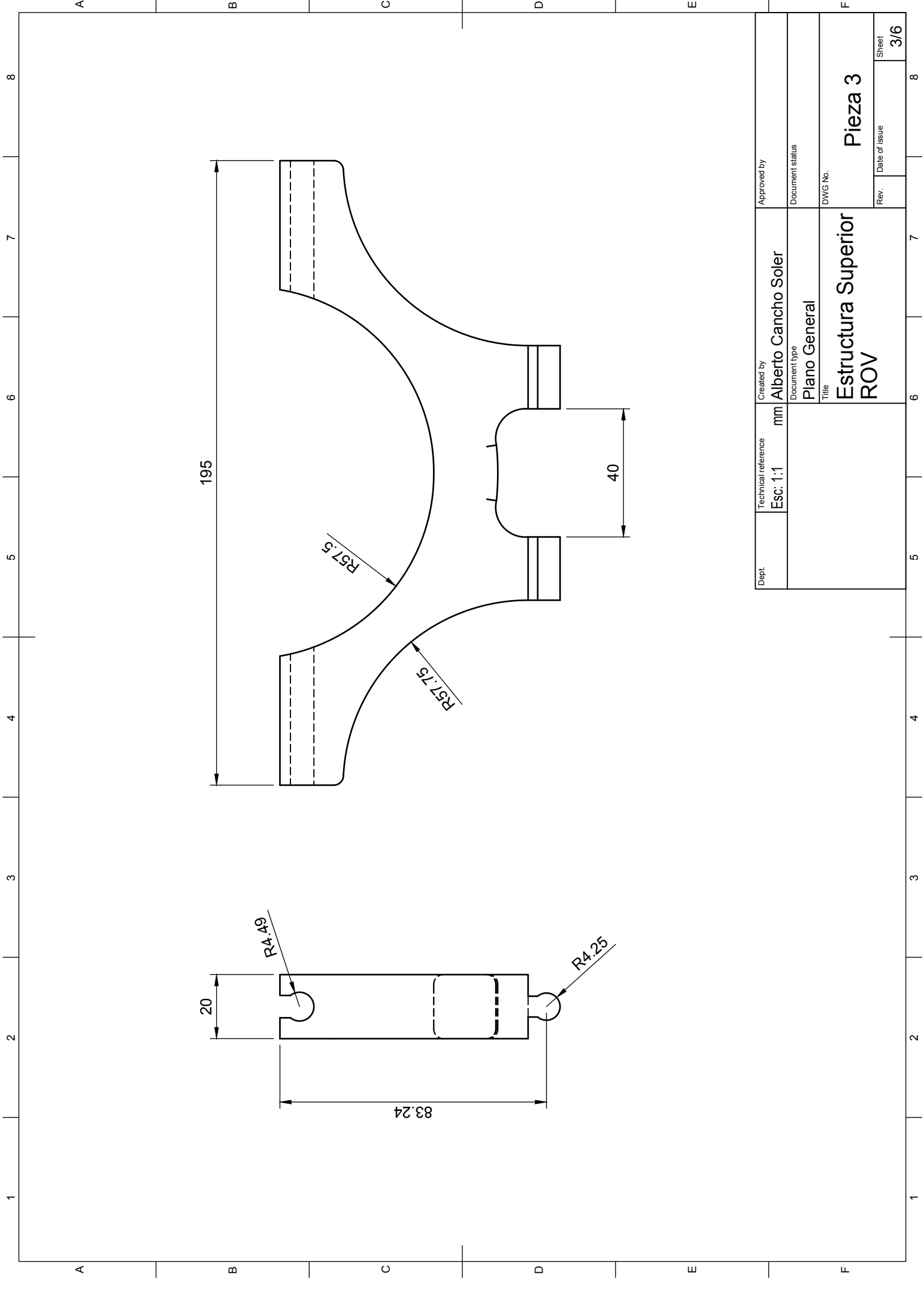
Dept.	Technical reference Esc: 1:1	mm	Created by <b>Alberto Cancho Soler</b>	Approved by
			Document type <b>Plano General</b>	Document status
			Title <b>Estructura Superior ROV</b>	DWG No. <b>Pieza 1</b>
			Rev.	Date of issue
			Sheet <b>1/6</b>	





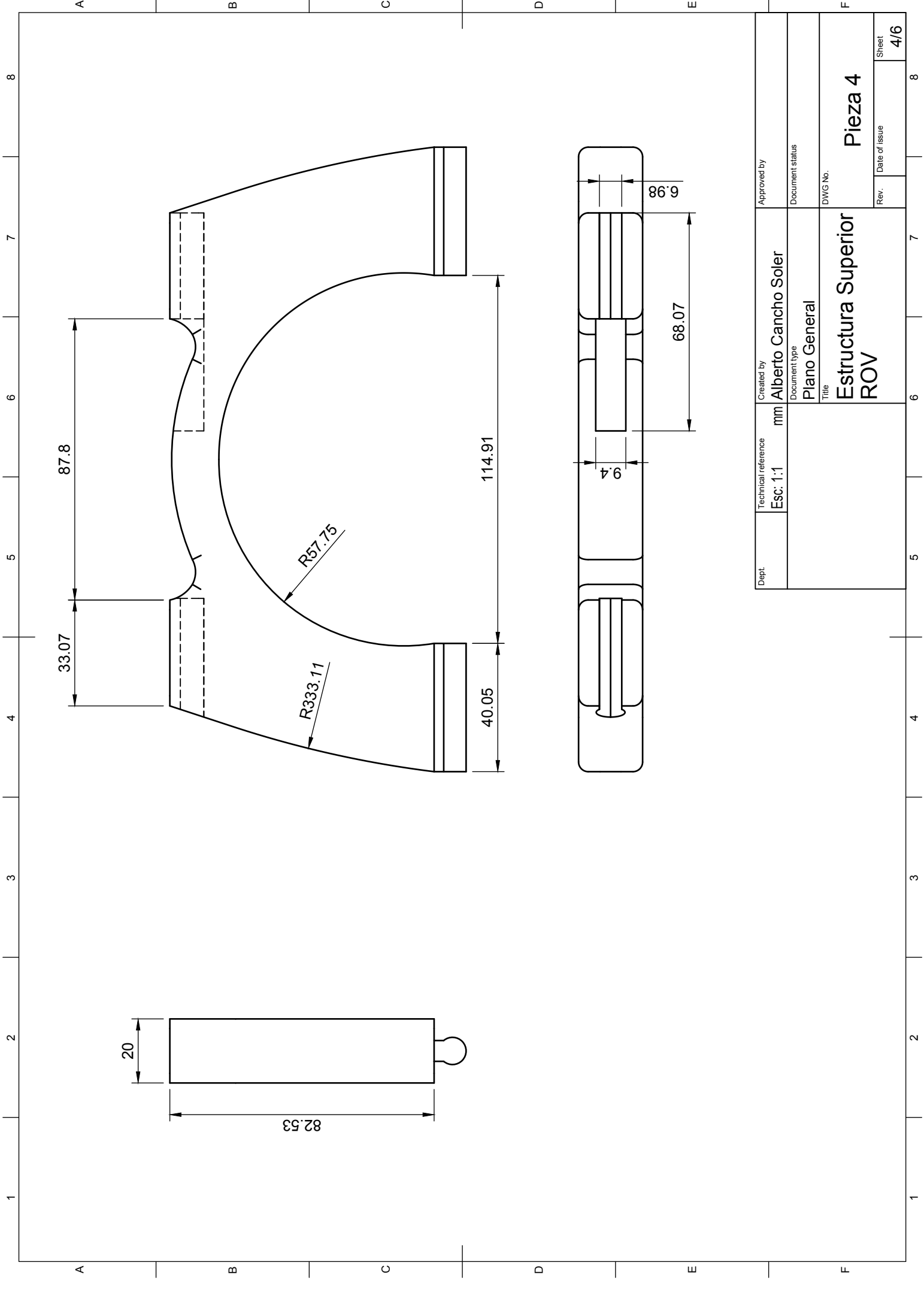






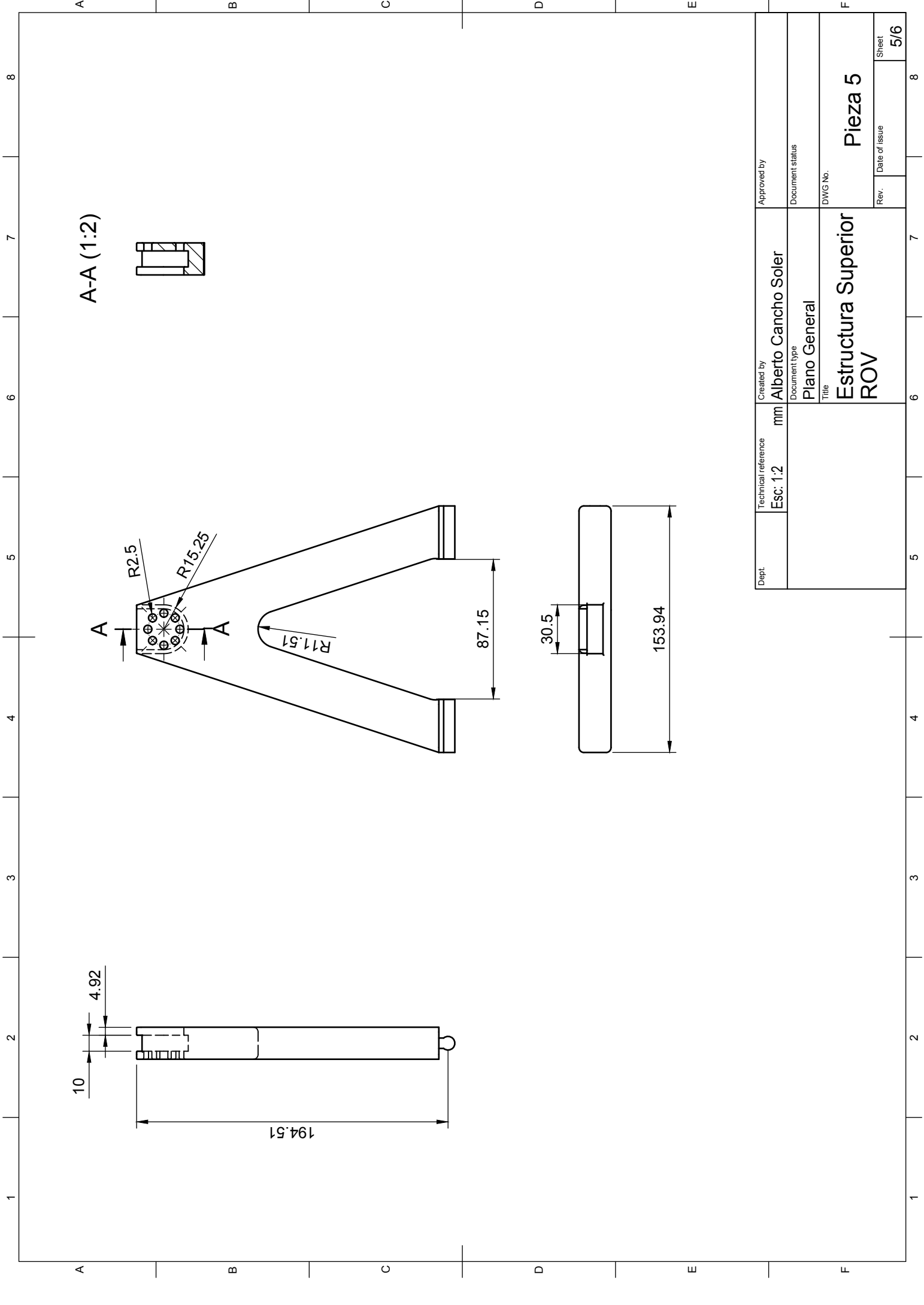
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	Esc: 1:1	mm	
		Alberto Cancho Soler	
		Document type	Document status
		Plano General	
		Title	DWG No.
		Estructura Superior	Pieza 3
		ROV	
			Rev.
			Date of issue
			Sheet
			3/6



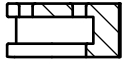


Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	Esc: 1:1	mm	
		Alberto Cancho Soler	
		Document type	Document status
		Plano General	
		Title	DWG No.
		Estructura Superior	Pieza 4
		ROV	
			Rev.
			Date of issue
			Sheet
			4/6





A-A (1:2)



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	
	Esc: 1:2	mm Alberto Cancho Soler	Document status	
		Plano General	DWG No.	
Title			Pieza 5	
Estructura Superior ROV			Rev.	Sheet
			Date of issue	5/6

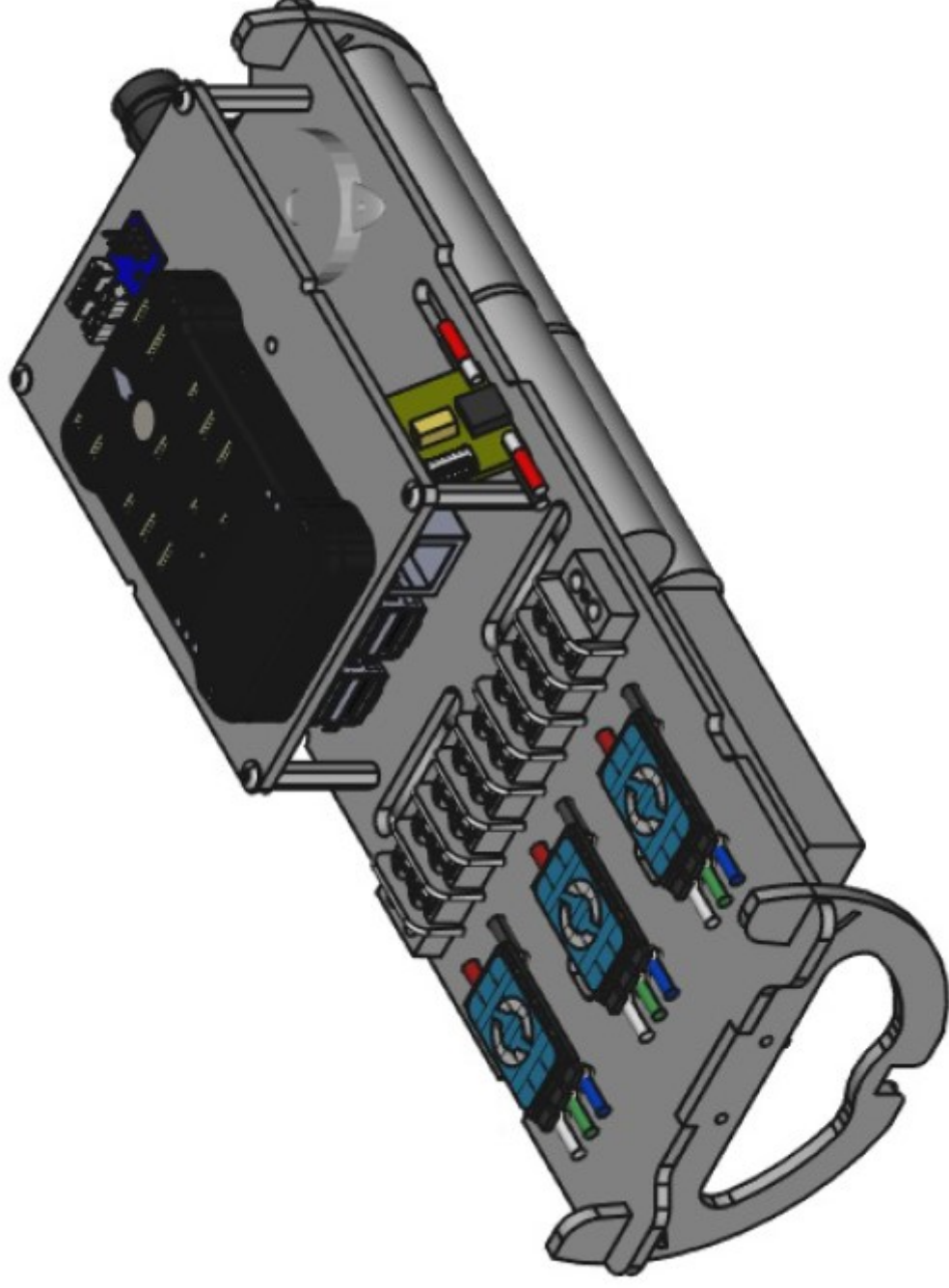




**Parte IV**

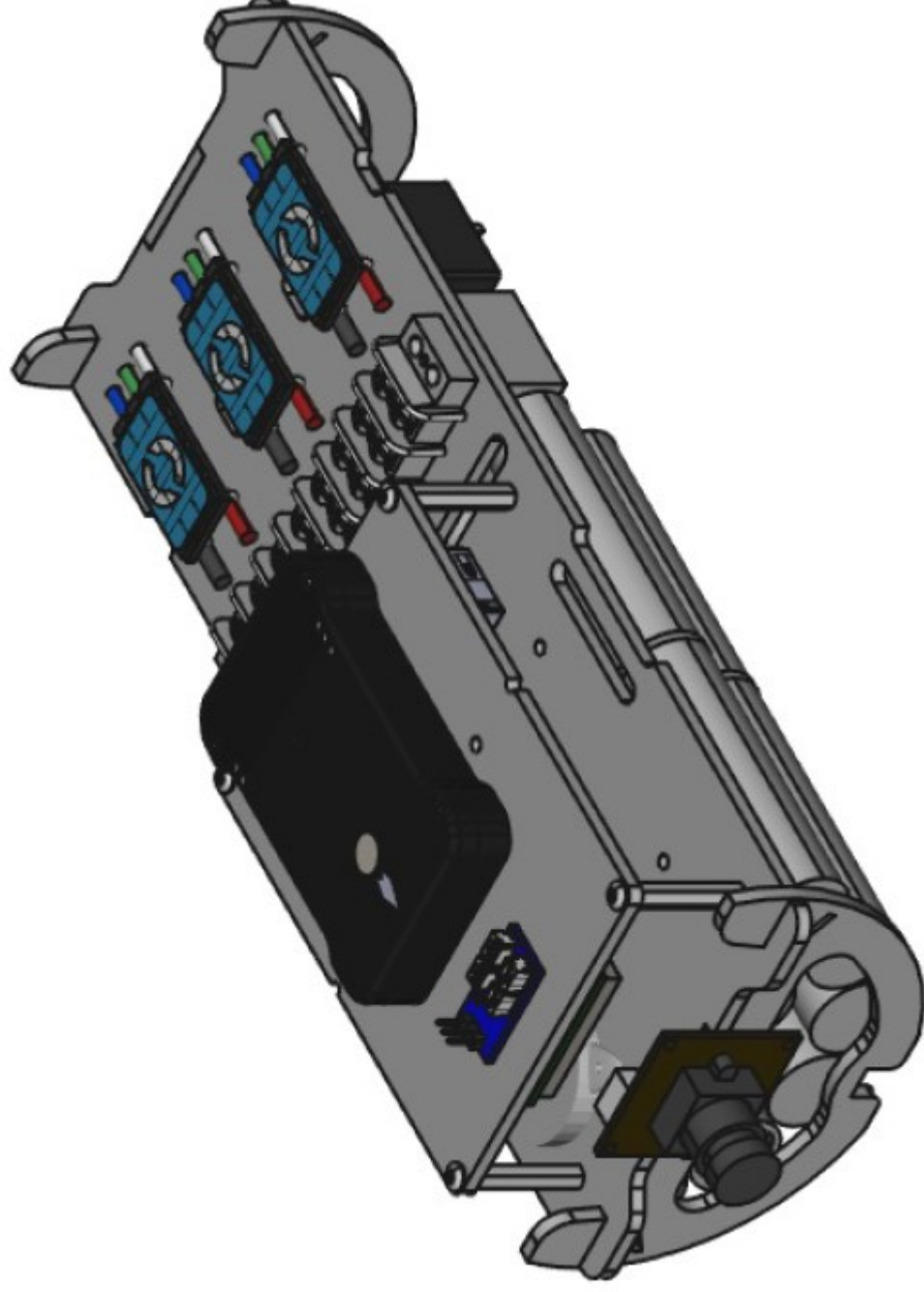
**Planos**





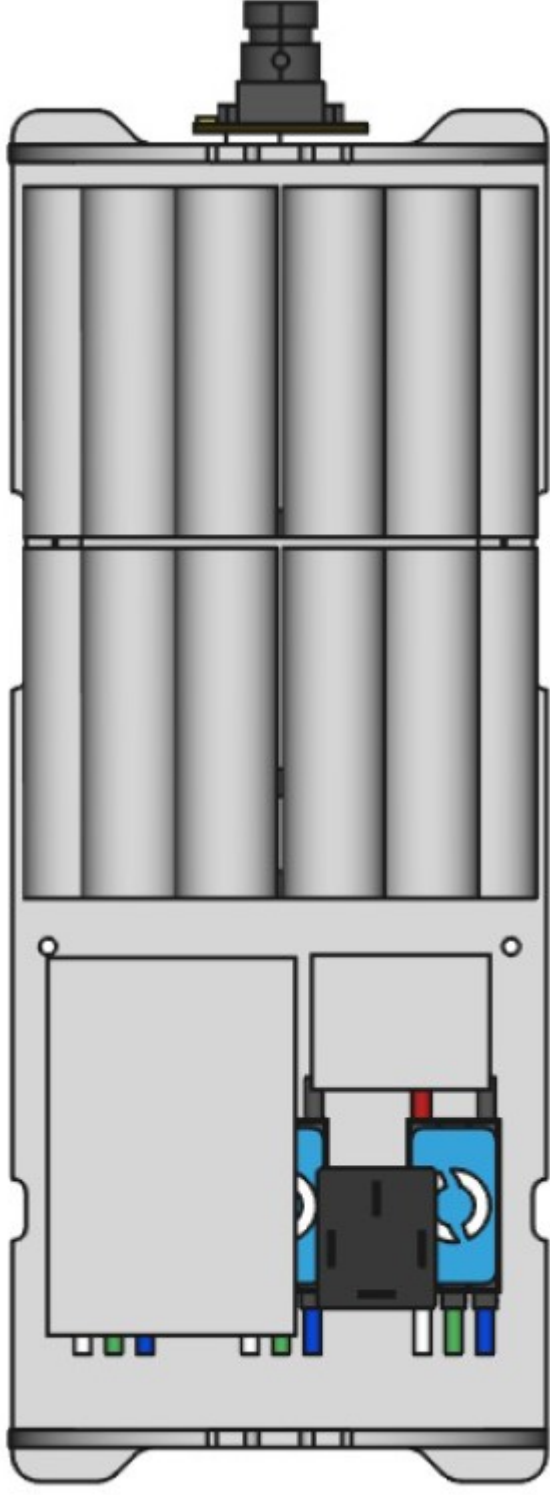
Creado por: Francisco Sayas		Título: Componentes ROV		Tamaño: A4	Hoja: 1 / 3	Escala:
Información suplementaria: Proyecto de adaptación de un vehículo operado a distancia para experimentación subacuática multipropósito				Número de parte:  Nro. plano: 1		
				Fecha: 14/09/2018		Revisión: REV A





Creado por: <b>Francisco Sayas</b>	Título: <b>Componentes ROV</b>	Tamaño: <b>A4</b>	Hoja: <b>2 / 3</b>	Escala:
Información suplementaria: <b>Proyecto de adaptación de un vehículo operado a distancia para experimentación subacuática multipropósito</b>		Número de parte:  Nro. plano: <b>1</b>		
		Fecha: <b>14/09/2018</b>	Revisión: <b>REV A</b>	

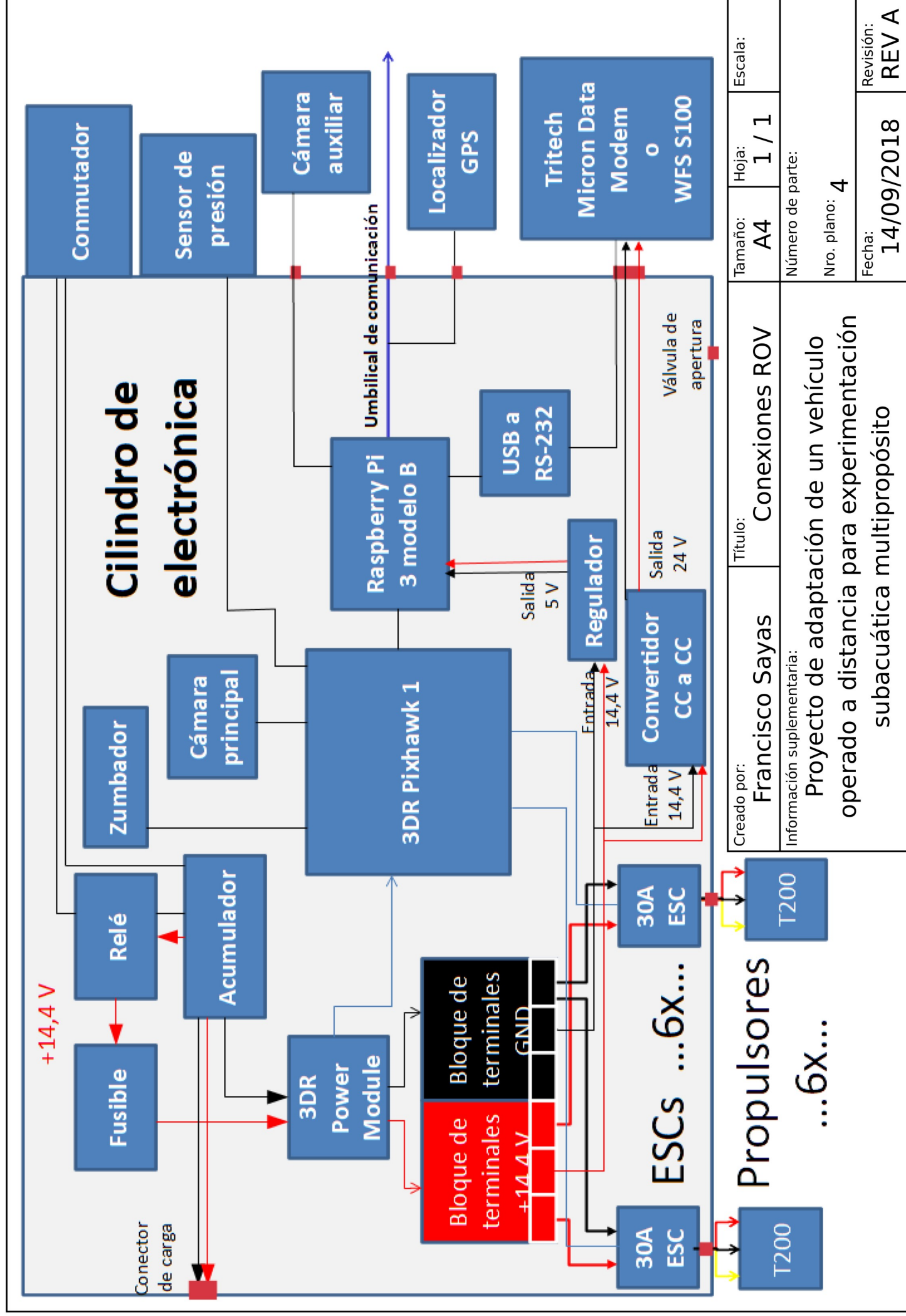




Creado por: <b>Francisco Sayas</b>	Título: <b>Componentes ROV</b>	Tamaño: <b>A4</b>	Hoja: <b>3 / 3</b>	Escala:
Información suplementaria: <b>Proyecto de adaptación de un vehículo operado a distancia para experimentación subacuática multipropósito</b>				
Número de parte: Nro. plano: <b>1</b>			Fecha: <b>14/09/2018</b>	Revisión: <b>REV A</b>







Creado por: Francisco Sayas	Título: Conexiones ROV	Tamaño: A4	Hoja: 1 / 1	Escala:
Información suplementaria: Proyecto de adaptación de un vehículo operado a distancia para experimentación subacuática multipropósito				
Número de parte: Nro. plano: 4				Revisión: REV A
Fecha: 14/09/2018				



Parte V

## Pliego de condiciones



## Capítulo 1

# Pliego de condiciones técnicas

## 1.1 Preinscripciones sobre los materiales

### 1.1.1 *PLA*

El filamento de ácido poliláctico o poliacido láctico (PLA) a utilizar en la fabricación de piezas estructurales deberá estar conformada a partir del polímero Ingeo 3D870 producido por Nature-Works.

Las bobinas deben estar en el momento de la recepción envasadas al vacío. Se almacenarán en un lugar seco y oscuro.

En el momento de utilizar la bobina se comprobará que el filamento no se rompe manualmente con facilidad. En caso contrario, se descartará el uso de la bobina.

### 1.1.2 *Resina epoxi*

La resina epoxi deberá estar catalogada como producto específico para uso marino.

La resina que así lo requiera deberá ser utilizada con la pistola de aplicación adecuada.

En cada caso, se deberá seguir las indicaciones de aplicación, almacenamiento y seguridad específicas de la resina.

Antes de utilizar una resina por primera vez, se someterá a una prueba para verificar que cumple su cometido. Para ello, se preparará un cilindro con un penetrador sellado y se sumergirá en agua a un metro de profundidad durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, se verificará que el penetrador sellado no presente daños y que el cilindro no haya perdido su condición de estanqueidad.

### ***1.1.3 Pegamento termofusible***

El pegamento termofusible no se considera como material de la solución final, si bien puede ser útil durante el proceso de construcción. En todo caso, deberá ser retirado una vez finalizados los procedimientos que requieran su aplicación.

### ***1.1.4 Tubo termoretráctil***

El tubo de termoretráctil deberá ser contraído con una pistola de aire caliente. En ningún caso se puede utilizar el soldador para realizar este cometido.

### ***1.1.5 Cinta aislante***

El aislamiento de las uniones de cableado eléctrico se debe realizar con tubo termoretráctil, según lo expuesto anteriormente. El uso de cinta aislante con este fin queda prohibido.

Parte VI

**Presupuesto**





## Capítulo 1

# Presupuesto

### 1.1 Consideraciones

- Los precios son aproximados.
- Las tareas de diseño, realizadas por un ingeniero, se presupuestan a  $50\text{€h}^{-1}$ . Las tareas de montaje, realizadas por un técnico, se presupuestan a  $30\text{€h}^{-1}$ . Esos precios incluyen implícitos el beneficio industrial y los gastos generales del Proyecto.
- El presupuesto no incluye seguros, costes de certificación y visado, permisos y licencias o cualquier otro concepto similar que no esté especificado en el mismo.

## 1.2 Presupuesto

Partida / Concepto	Cantidad (uds.)	Precio (€/ud.)	Precio (€)
<b>Herramientas</b>			1400
Herramientas de uso general		200	
Equipos electrónicos		500	
Ordenador portátil		700	
<b>Equipos especiales</b>			20290
BlueRobotics BlueROV		1300	
Kit electrónico BlueROV		300	
Módems de radiofrecuencia		5170	
Módems acústicos		7200	
Cámara de alta definición		90	
Kit GPS subacuático		5010	
Baterías		160	
Celdas de litio	20	3	60
Conectores subacuáticos	20	50	1000
<b>Material fungible</b>			400
Consumibles generales		200	
Consumibles electrónicos		200	
<b>Primer prototipo</b>			2720
Diseño	40	50	2000
Montaje	24	30	720
<b>Prueba primer prototipo</b>			550
Pruebas en piscina	8	50	400
Alquiler de vehículo			100
Dietas			50
<b>Prueba radiofrecuencia</b>			760
Diseño	2	50	100
Montaje	2	30	60
Material fungible			50
Pruebas en piscina	8	50	400
Alquiler de vehículo			100
Dietas			50

Partida / Concepto	Cantidad (uds.)	Precio (€/ud.)	Precio (€)
<b>Segundo prototipo</b>			2960
Diseño	40	50	2000
Montaje	32	30	960
<b>Prueba segundo prototipo</b>			550
Pruebas en piscina	8	50	400
Alquiler de vehículo			100
Dietas			50
<b>Producto final</b>			5200
Diseño	80	50	4000
Montaje	40	30	1200
<b>Verificaciones finales</b>			550
Pruebas en piscina	8	50	400
Alquiler de vehículo			100
Dietas			50
TOTAL SIN IVA			35 380 €
IVA (21 %)			7429,8 €
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>			42 809,8 €

CUARENTA Y DOS MIL OCHOCIENTOS NUEVE EUROS CON OCHENTA CÉNTIMOS

